Guia do Usuário

TLS

Transporte de LNAPL no Solo

Autores

Eng. Dr. André Moreira de Souza Filho
PETROBRAS/CENPES

Eng. Dr. Marcio R. Schneider
UFSC/REMA

Eng. Dr. Admir José Giachini
UFSC/REMA

Eng.ª Eduarda Gabriele R. Rudek
UFSC/REMA

Eng.ª Dra. Ana Claudia Canalli Bortolassi
UFSC/REMA

Eng. Gusttav Bauermann Lang
UFSC/REMA

Bel. Vanderval Borges de Souza Junior
UFSC/REMA

Organizadoras: **Bolsistas de Inovação Tecnológica**

Amanda Rafaella Campos | Giovanna Viana Pitoli | Isabelle França
Julia Viel Vitali | Letícia Marianne Costa | Mayara Dargas Sousa

PETROBRAS | anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis | UFSC | rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE | Atena Editora

Ano 2024

Guia do Usuário

TLS

Transporte de LNAPL no Solo

Autores

Eng. Dr. André Moreira de Souza Filho
PETROBRAS/CENPES

Eng. Dr. Marcio R. Schneider
UFSC/REMA

Eng. Dr. Admir José Giachini
UFSC/REMA

Eng.ª Eduarda Gabriele R. Rudek
UFSC/REMA

Eng.ª Dra. Ana Claudia Canalli Bortolassi
UFSC/REMA

Eng. Gusttav Bauermann Lang
UFSC/REMA

Bel. Vanderval Borges de Souza Junior
UFSC/REMA

Organizadoras: **Bolsistas de Inovação Tecnológica**

Amanda Rafaella Campos | Giovanna Viana Pitoli | Isabelle França
Julia Viel Vitali | Letícia Marianne Costa | Mayara Dargas Sousa

PETROBRAS
anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UFSC
rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE
Atena Editora
Ano 2024

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Thamires Camili Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Guia do usuário
TLS - Transporte de LNAPL no solo

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Jeniffer dos Santos
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G943 Guia do usuário TLS - Transporte de LNAPL no solo / Organizadoras Amanda Rafaella Campos, Giovanna Viana Pitoli, Isabelle França, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.

Outras organizadoras:
Julia Viel Vitali
Letícia Marianne Costa
Mayara Dargas Sousa

Autores:
André Moreira de Souza Filho
Marcio Roberto Schneider
Admir José Giachini
Eduarda Gabriele Ramser Rudek
Ana Claudia Canalli Bortolassi
Gusttav Bauermann Lang
Vanderval Borges de Souza Junior

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-2928-9
DOI https://doi.org/10.22533/at.ed.289242012

1. Engenharia de Software. I. Campos, Amanda Rafaella (Organizadora). II. Pitoli, Giovanna Viana (Organizadora). III. França, Isabelle (Organizadora). IV. Título.
CDD 005.2

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DO AUTOR

DECLARAÇÃO DA EDITORA

AGRADECIMENTOS

Queremos registrar aqui nossos mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para tornar este projeto realidade. O sucesso deste livro deve-se inteiramente à colaboração, ao apoio e à dedicação de pessoas que foram essenciais para sua realização.

Ao Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil (in memoriam), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que iniciou os primeiros estudos sobre a contaminação de solos e águas subterrâneas e contribuiu muito com os avanços tecnológicos na área.

Ao corpo gerencial e técnico da Petrobras, André Bueno Portes, Bruno Pereira Faria, Camila Tolledo Santos, Flavia Goncalves de Castro, Flavio Barbosa Bezerra, Marco Antonio Batista da Silva, Ricardo Schutz, Rodrigo Augusto Marques, Adriana Ururahy Soriano, Deivid Lucas dos Santos Migueleti, Leonardo Mitidiero Mansor, Leonardo Vieira Gomes da Silva, Luiz Fernando Martins, Marcelo Bizzoni, Marcus Paulus Martins Baessa e Tiago Magalhaes Soares, pelo apoio ao desenvolvimento e aplicação do software SUITE. Além disso, por compartilhar conhecimento e dados relevantes utilizados na simulação dos estudos de caso.

À Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo apoio à pesquisa científica e incentivo à aplicação de tecnologias de inovação na indústria de petróleo, gás natural e combustível.

Aos pesquisadores, professores, técnicos e bolsistas de inovação tecnológica do Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente (REMA), em especial ao Prof. Dr. Admir José Giachini (Coordenador do Projeto) e às colaboradoras Amanda Rafaella Campos, Giovanna Viana Pitoli, Isabelle França, Julia Viel Vitali, Letícia Marianne Costa e Mayara Dargas Sousa, que se dedicaram a esse projeto.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

O problema ocasionado pelos vazamentos acidentais de petróleo, derivados e biocombustíveis em ambientes terrestres (*onshore*) resulta em impactos ambientais e à saúde humana. Além dos impactos, há o custo contínuo de milhões de reais por ano em ações de gerenciamento de áreas contaminadas visando à mitigação dos danos dos vazamentos, as multas ambientais e contenciosos jurídicos. Um dos principais fatores limitantes ao encerramento de casos de vazamentos é a ocorrência persistente de hidrocarbonetos de petróleo no solo e aquíferos como substância imiscível menos densa que a água (LNAPL – *Light Nonaqueous Phase Liquid*). De senso comum, o LNAPL é percebido como uma ameaça ambiental devido aos riscos potenciais de explosão, toxicidade, mobilidade e a possibilidade de gerar plumas de contaminação dissolvidas nas águas e no ar, com potencial para atingir receptores afastados da fonte de contaminação.

A recuperação do LNAPL em áreas contaminadas é uma atividade que exige experiência e conhecimento técnico na elaboração e execução dos projetos de remediação. Em comparação com os eventos de explotação de petróleo em áreas de produção onde, menos de 40% do óleo presente no reservatório é explorado, a eficiência da recuperação do LNAPL em áreas contaminadas também é baixa. A alta complexidade do comportamento do LNAPL no solo e a ausência de modelos matemáticos integrados de apoio à tomada de decisão têm levado à compreensão inadequada dos cenários de contaminação, resultando na adoção de estratégias de remediação sem eficácia e intermináveis, gerando custos que poderiam ser evitados.

O *software* TLS – Transporte de LNAPL no Solo foi desenvolvido com o propósito de simular o comportamento da migração e distribuição vertical de hidrocarbonetos de petróleo em fase livre na zona não saturada de solos tropicais, a partir de cenários de fontes primárias ativas (tanques, dutos e demais sistemas de transporte e armazenamento com liberação de produto para o ambiente), para embasar a seleção de técnicas de remediação de forma mais eficiente, considerando a constante dielétrica e as características reológicas no modelo de transporte de fluidos polares e apolares.

O principal diferencial das formulações desenvolvidas incluiu a incorporação dos efeitos da constante dielétrica dos fluídos em solos argilosos expansivos, na formulação matemática de Richards e Green-Ampt, permitindo maior confiabilidade na simulação da infiltração do LNAPL em solos argilosos tropicais. Corseuil *et al.* (2020) realizaram a avaliação da permeabilidade do LNAPL em solos tropicais argilosos em diversos terminais de armazenamento de combustíveis no país. O estudo indicou que a presença de argilominerais expansivos pode afetar o comportamento da infiltração de LNAPL, de forma muito mais significativa, em relação à infiltração da água. Os resultados deste estudo demonstraram que, além das características físicas do meio poroso, da densidade e viscosidade do LNAPL, a velocidade de escoamento do LNAPL pode ser de até três

ordens de grandeza maior do que a da água na presença de solos argilosos expansivos. A principal explicação para este fenômeno está relacionada à constante dielétrica dos fluídos, a qual pode afetar a condutividade hidráulica em solos argilosos expansivos. Desta forma, quando um fluido polar (ex.: água) possui afinidade com o argilomineral, ele tende a ficar retido no solo argiloso, não somente pela densidade e viscosidade, mas devido às ligações moleculares, diminuindo a condutividade hidráulica. O inverso ocorre com os fluidos apolares (ex.: petróleo, gasolina, óleo diesel e óleo mineral), que apresentam baixa constante dielétrica. Portanto, considerando a alta relevância das interações elétricas dos fluidos com os solos argilosos expansivos, este fenômeno foi considerado no modelamento matemático proposto.

1.1 O que é o TLS?

O TLS é um simulador matemático que prevê a migração e distribuição vertical da fase livre, a partir de fontes de contaminação ativas (tanques aéreos, subterrâneos ou empoçamento superficial), de modo a conhecer o seu comportamento através da zona não saturada. Este simulador pode ser utilizado antes do evento de vazamento, de maneira preventiva, para que se possa antecipar o tempo disponível para a remediação antes que a contaminação atinja o nível do lençol freático, ou, após o vazamento, para apoio à tomada de decisão no âmbito do Gerenciamento de Áreas Contaminadas.

As formulações matemáticas calculam o transporte vertical do LNAPL na zona não saturada, originado da liberação de hidrocarbonetos de petróleo oriundos de vazamentos em tanques aéreos e subterrâneos (fontes primárias), considerando a presença da franja capilar. As taxas de migração do LNAPL são resultado da ação da força gravitacional e da força capilar, além de considerar a presença de argilominerais no meio poroso. O modelamento considera uma geometria bidimensional axissimétrica com fronteiras laterais (leste e oeste) abertas. O limite inferior (sul) é aberto quando não há presença de franja capilar e fechado quando fizer limite com a zona saturada.

O modelamento matemático do transporte vertical do LNAPL na zona não saturada tomou como base a Lei de Darcy, para cada fluido presente no meio contaminado, e a relação empírica de pressão (P), saturação (S) e permeabilidade (k). No desenvolvimento e na adaptação das formulações matemáticas foram assumidas as seguintes hipóteses e considerações:

- Sistema isotérmico (as propriedades dos fluidos se mantêm constantes);
- A água é o fluido molhante; o LNAPL, o intermediário e o ar o fluido, não molhante;
- Escoamento trifásico (água, LNAPL e ar) e fluxo transiente;
- A água e o LNAPL foram considerados fluidos incompressíveis;

- O fluxo de ar no meio poroso é dependente do fluxo de LNAPL e de água;
- Durante a migração do LNAPL não são considerados os efeitos da histerese;
- Foram considerados os efeitos da força capilar e da força gravitacional;
- Foram considerados os efeitos da franja capilar sobre o escoamento;
- A saturação inicial de água está em estado estacionário e a altura geométrica é dada pela posição do lençol freático;
- Heterogeneidade do solo;
- Camadas impermeáveis podem afetar o fluxo do LNAPL e da água;
- Foram considerados os efeitos da constante dielétrica do LNAPL e do índice de plasticidade do solo no fluxo de migração do LNAPL (efeito da ocorrência de argilominerais expansivos);
- Escoamento do LNAPL a partir da fonte primária (ex.: tanque, duto ou poça) é transiente;
- Simulação 2D (problema axissimétrico); e
- Solução numérica: método dos volumes finitos (FVM).

1.2 Funcionalidades do TLS

As principais funcionalidades do TLS incluem:

- Simulação da migração vertical e espalhamento lateral de LNAPL no meio poroso a partir de tanques aéreos, subterrâneos ou empoçamento superficial;
- Quantificação do tempo necessário para que o LNAPL atinja o lençol freático;
- Cálculo do volume de LNAPL por profundidade e volume acumulado;
- Simulação do esvaziamento do tanque e/ou poça de produto ao longo do tempo;
- Apresentação do perfil de saturação de LNAPL e água por profundidade;
- Inclusão de regiões proibidas (rochas, solos impermeáveis) na caracterização do meio;
- Consideração do efeito das interações elétricas dos fluidos com os solos argilosos com predominância de argilominerais expansivos; e
- Auxílio nas estimativas do tempo de resposta das ações emergenciais, planejamento de ações de contingência e na previsão de cenários de contaminação para definição de ações preventivas e de remediação.

1.3 Requisitos mínimos do sistema

- Windows 10
- 8GB de RAM (mínimo), 16GB (recomendado)
- Intel Core i3 (mínimo), Intel Core i7 (recomendado)
- Processador Gráfico: 1024x768 (mínimo), Full HD (recomendado)

2 UTILIZANDO O TLS

2.1 Inicialização do SUITE e seleção do banco de dados

Após clicar duas vezes no ícone de inicialização do *software* SUITE, uma janela é apresentada conforme a Figura 2.1. Estão disponíveis as opções "Carregar banco de dados existente" ou criar um "Novo banco de dados". Caso seja a primeira vez utilizando o SUITE, o usuário deve selecionar a opção "Novo banco de dados". Após, uma janela será apresentada para escolha do local onde o banco de dados será salvo. Ao selecionar a pasta desejada, clique em "Salvar" para criar um arquivo de extensão "*.db*".



Figura 2.1. Seleção do banco de dados.

O arquivo *.db* é responsável por armazenar todas as informações referentes às simulações realizadas, incluindo dados dos solos e produtos utilizados. Este arquivo pode ser compartilhado, conforme mais detalhes apresentados no Item 3.1. Após criar e salvar o arquivo *.db*, uma mensagem é apresentada na tela (Figura 2.2).

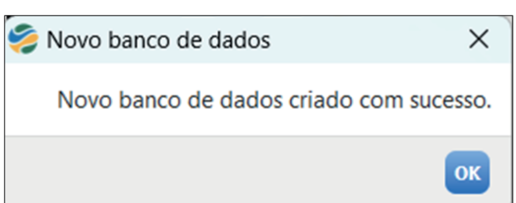


Figura 2.2. Novo banco de dados criado com sucesso.

Ao criar o banco de dados, o usuário pode selecionar a inserção de valores padrão para o novo banco de dados, visando adicionar informações básicas de solos e produtos conhecidos pela literatura, conforme a Figura 2.3.

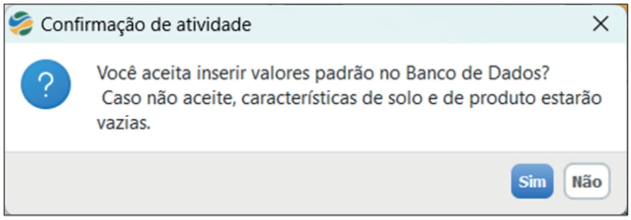


Figura 2.3. Inserir valores padrão no banco de dados.

Caso o usuário já tenha criado um banco de dados previamente ou deseje utilizar um banco de dados fornecido, basta selecionar a opção “Carregar Banco de dados existente” (Figura 2.1). Uma janela será apresentada para seleção do arquivo *.db*. Se o banco de dados for carregado corretamente, uma mensagem será apresentada na tela (Figura 2.4).

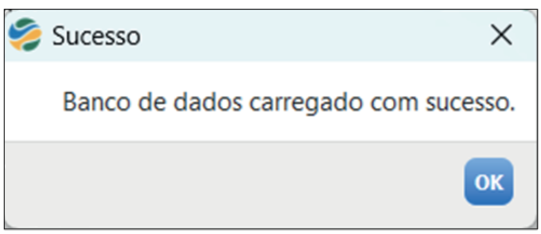


Figura 2.4. Banco de dados carregado com sucesso.

Para mais informações sobre como os projetos são salvos no banco de dados e como compartilhá-los, consulte o Item 3.1. A seleção do banco de dados é um procedimento padrão, que sempre deve ser realizado ao inicializar o SUITE.

2.2 Nova simulação

Para iniciar uma nova simulação, o usuário deve selecionar o ícone “Transporte de LNAPL no Solo – TLS” na tela inicial (Figura 2.5). Ou, então, clicar no ícone “Novo”, localizado abaixo do menu “Arquivo” na aba superior (Figura 2.5). Também é possível selecionar “Arquivo Novo” (Figura 2.6). O menu “Arquivo” possui outros comandos, como abrir uma simulação já realizada e salvar mudanças efetuadas durante o processo.

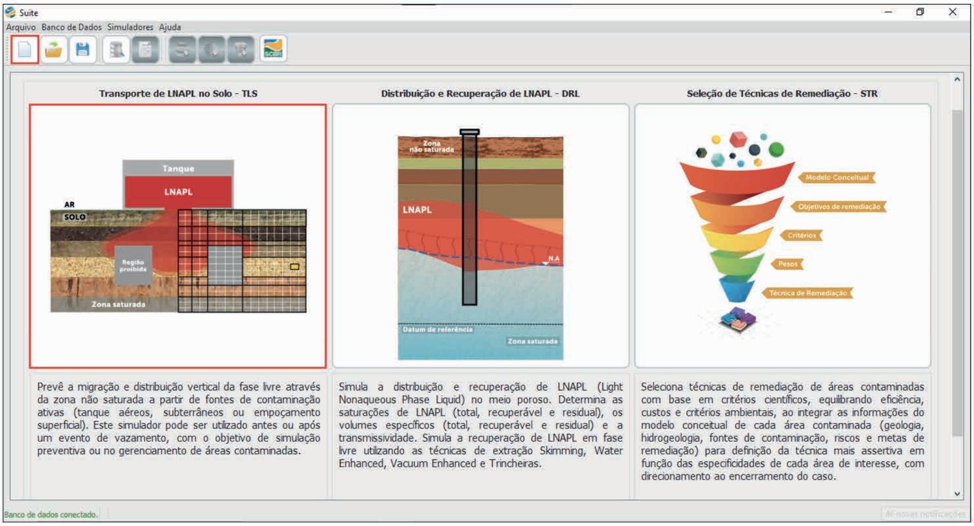


Figura 2.5. Área de trabalho inicial da SUITE de simuladores.

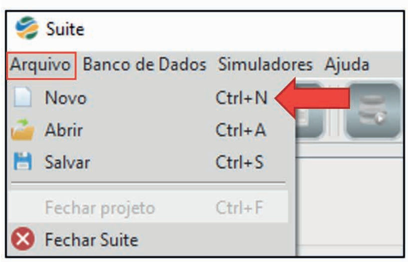


Figura 2.6. Clique em “Arquivo” e “Novo” para iniciar um novo projeto.

Ao selecionar uma destas opções, uma nova janela é aberta, permitindo a seleção de um dos três simuladores que compõem o SUITE. Para criar um novo projeto, basta selecionar a opção “TLS” e clicar em “Criar”, conforme indicado na Figura 2.7. A interface inicial do TLS é apresentada na Figura 2.8.

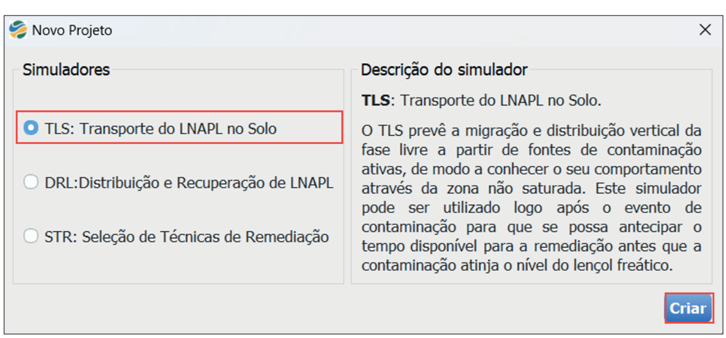


Figura 2.7. Janela para escolher o simulador utilizado.

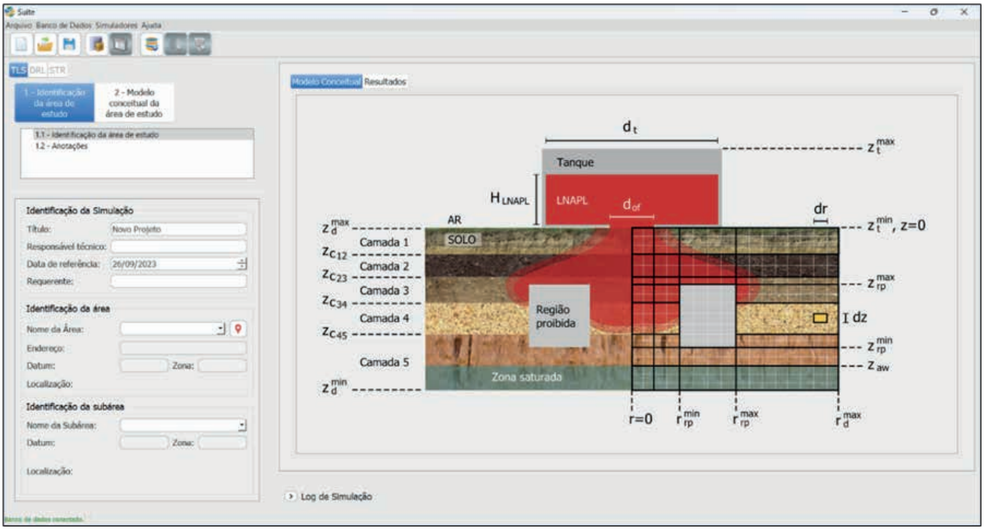


Figura 2.8. Interface inicial do TLS.

Para abrir uma simulação salva anteriormente, o usuário deve clicar no ícone “Abrir”, abaixo do menu “Arquivo”, como indicado na Figura 2.9, ou então, basta ir em “Arquivo Abrir” como indicado na Figura 2.10.



Figura 2.9. Ícone para abrir um projeto.

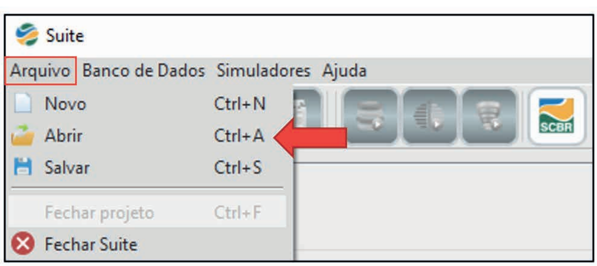


Figura 2.10. Abrir projeto pela barra de menus.

Ao selecionar uma destas opções, é possível visualizar todos os projetos salvos no SUITE. Para abrir um projeto no TLS, basta selecionar o projeto de interesse e clicar em “Abrir”, conforme indicado na Figura 2.11.

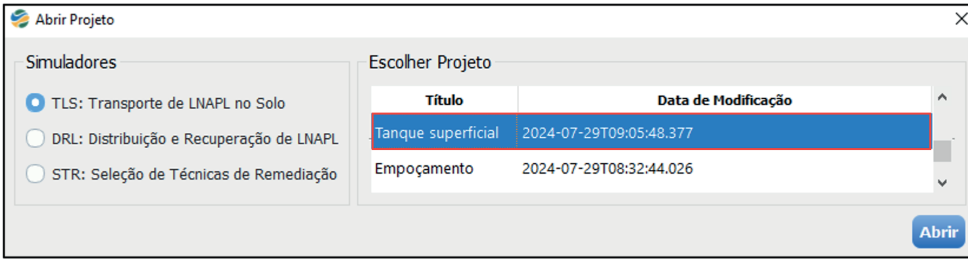


Figura 2.11. Abrir um projeto já salvo no SUITE.

2.3 Banco de dados

O item “Banco de Dados”, apresentado na barra de menus (Figura 2.12), compila informações pertinentes sobre tipos de solos e produtos previamente cadastrados. Para visualizar os parâmetros cadastrados, basta clicar sobre o menu “Banco de Dados” e, posteriormente, em “Abrir Banco de Dados TLS e DRL”. O banco de dados é apresentado conforme Figura 2.13.

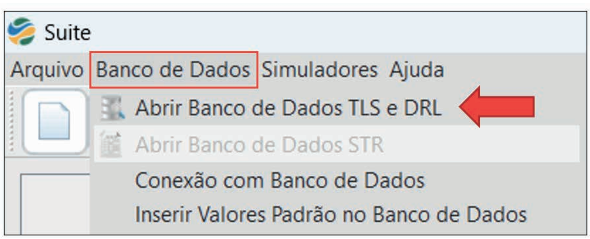


Figura 2.12. Abrir banco de dados.

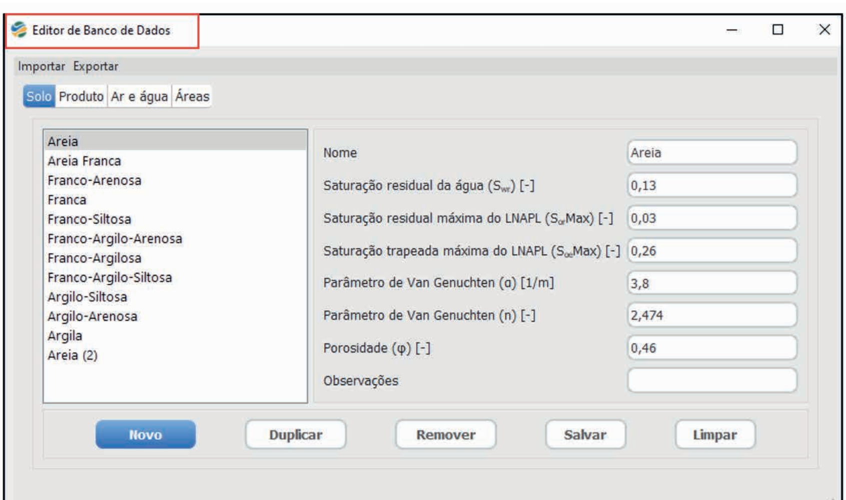


Figura 2.13. Interface do banco de dados.

2.3.1 Cadastro de novo solo ou produto

Para cadastrar um novo solo/produto não contemplado no banco de dados, basta clicar em "Novo", como mostra a Figura 2.14. Na sequência (Figura 2.15), é possível inserir os dados solicitados referentes ao solo ou produto que se deseja cadastrar. Também é permitido remover um solo/produto já cadastrado ou adicionar um solo/produto com as mesmas características já cadastradas, ao clicar em "Duplicar". Antes de fechar a janela, clique em "Salvar".

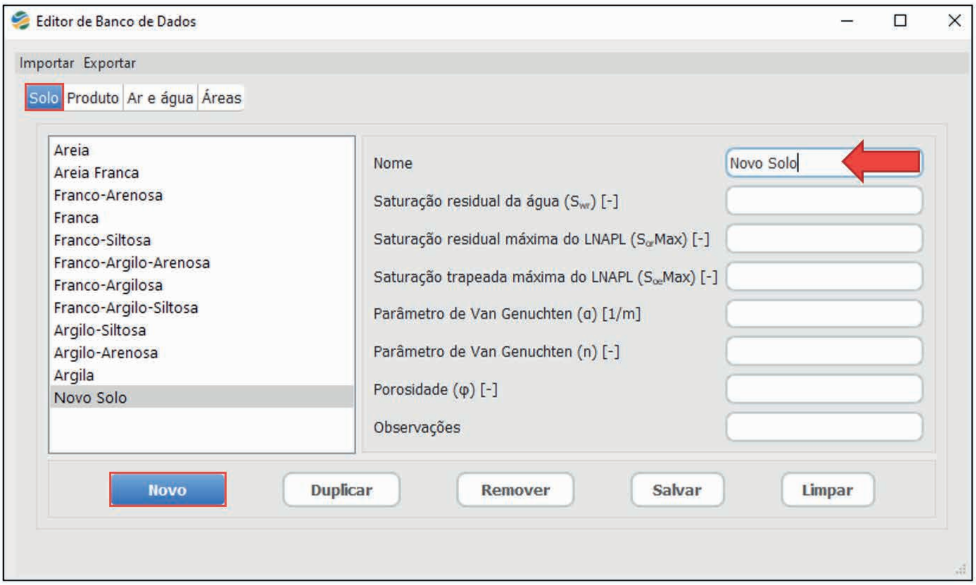


Figura 2.14. Inserir novo solo/produto no banco de dados.

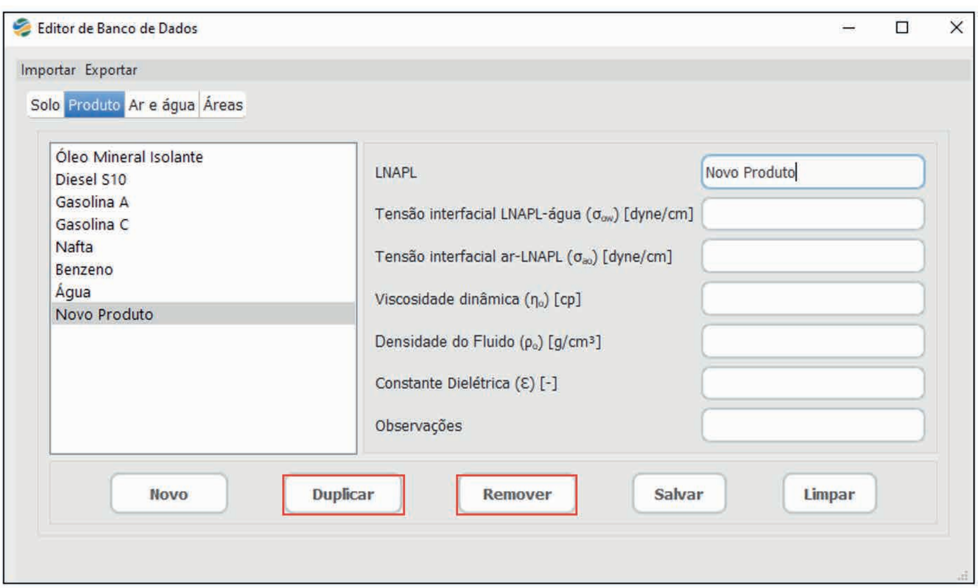


Figura 2.15. Duplicar ou remover um tipo de solo/produto no banco de dados.

Outra forma de cadastrar um novo solo/produto é através da importação de um arquivo em formato *.csv*. Para obter o *template* de importação, basta selecionar a opção "Exportar" na parte superior da aba do banco dados e escolher "Exportar ⟶ *Template* de Solos ou Produtos" (Figura 2.16). Também é possível exportar todos os solos/produtos já cadastrados no banco de dados, como indicado na Figura 2.16.

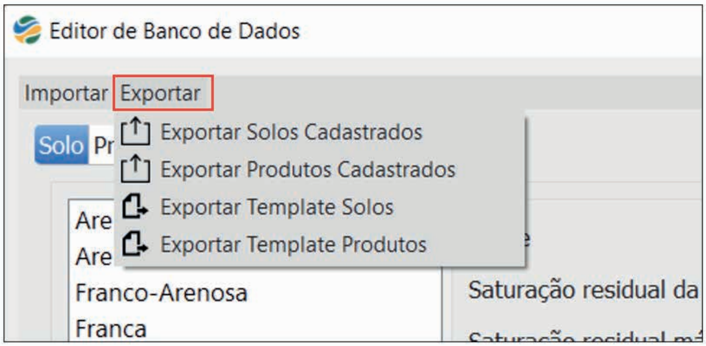


Figura 2.16. Exportar *template* e dados cadastrados.

Após preencher os dados solicitados no *template,* é possível importá-lo selecionando a opção "Importar Solo ou Produto" (Figura 2.17). Se a importação for bem-sucedida, uma mensagem indicando que o solo ou produto foi importado com sucesso aparecerá em sua tela. Caso a importação não seja bem-sucedida, consulte o Item 3.9. Esta opção é útil para a inserção de múltiplos solos/produtos de forma rápida e eficiente.

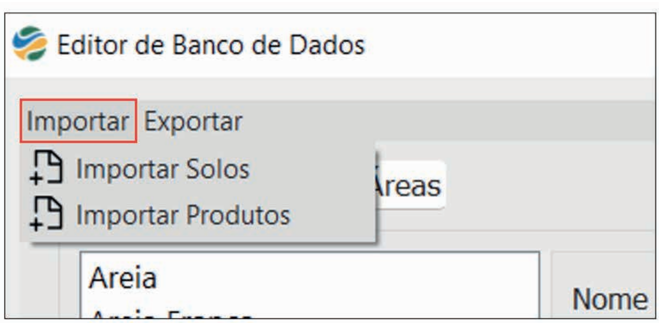


Figura 2.17. Importar *template* no formato *.csv.*

Além de informações a respeito do tipo de solo e produto, o banco de dados contém parâmetros padrão referentes ao ar e água e também sobre as áreas cadastradas (Figura 2.18).

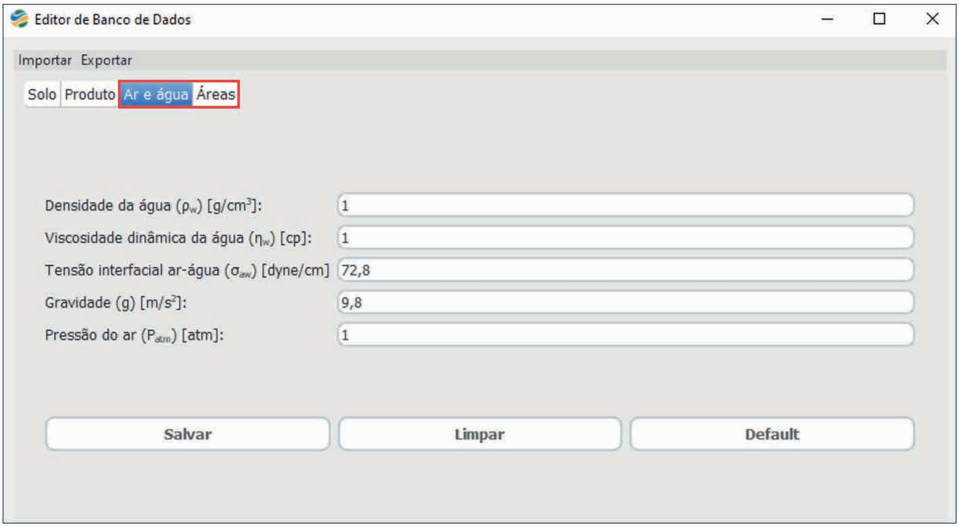


Figura 2.18. Informações padrão de "Ar e Água" no banco de dados.

2.3.2 Cadastro de novas áreas e subáreas

Ainda em "Editor de Banco de Dados", para cadastrar áreas e subáreas de estudo, basta clicar em "Áreas → Novo" (Figura 2.19). É necessário adicionar o link de geolocalização da área de interesse ou as coordenadas geográficas. Como exemplo, é sugerida a utilização do *Google Earth* (versão *web*), conforme apresentado na Figura 2.20. Contudo, outros links, como a *homepage* do projeto, também poderão ser inseridos. Para visualizar o link de referência, copie-o e cole no navegador *web*. Após o preenchimento desses dados, clique em "Salvar".

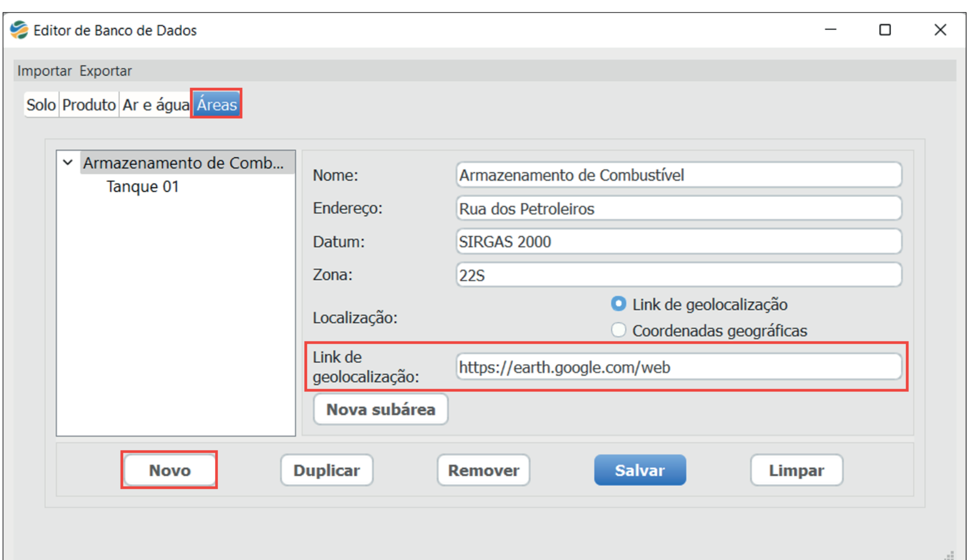


Figura 2.19. Cadastro de nova área.

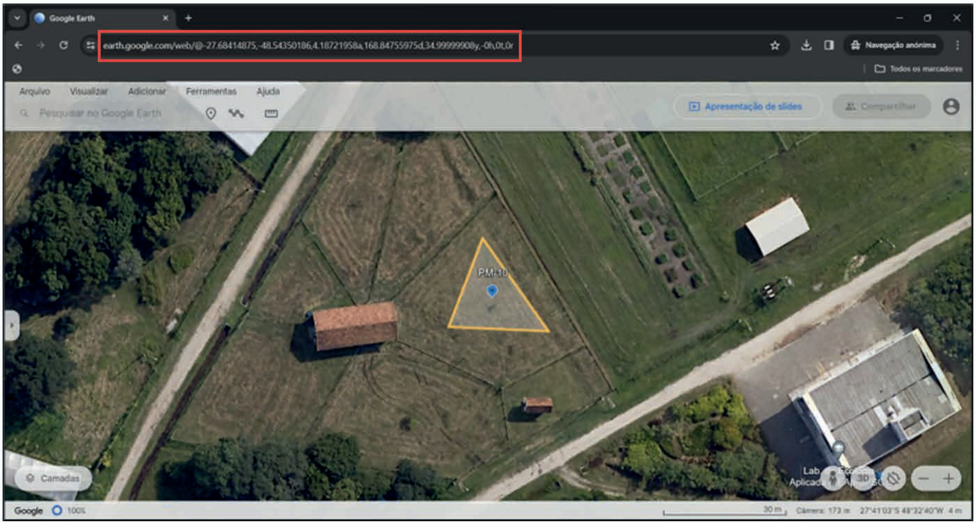


Figura 2.20. Link do Google Earth do ponto de referência.

2.4 Área de trabalho do TLS

A área de trabalho do TLS está organizada conforme indicado na Figura 2.21. O TLS é formado por duas áreas principais: Área 1 e Área 2, cujas funcionalidades são descritas a seguir.

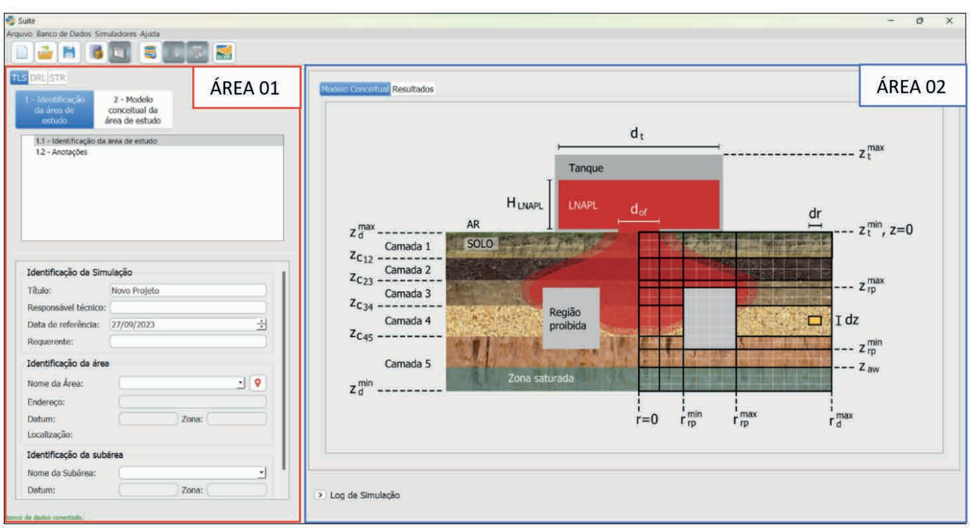


Figura 2.21. Área de trabalho do TLS.

<u>Área 1</u>: local em que são inseridos os dados de entrada das etapas da simulação (Figura 2.22).

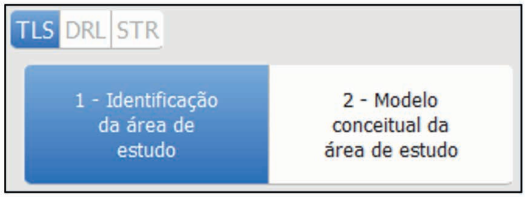


Figura 2.22. Área 1 – Etapas da simulação.

- 1 - Identificação da área de estudo: tem a finalidade de armazenar os dados de identificação das áreas e subáreas de estudo, como o nome e a localização. Além disso, é possível inserir os dados de identificação da simulação, como o título do projeto e o responsável técnico.
- 2 – Modelo conceitual da área de estudo: etapa onde deve ser selecionado o modelo conceitual, além dos dados referentes à caracterização do cenário de liberação do produto e as configurações da simulação.

Área 2: onde são apresentados o modelo conceitual da área de estudo e os resultados da simulação. Essa região é dividida em duas abas: modelo conceitual e os resultados (Figura 2.23).

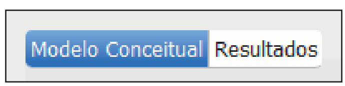


Figura 2.23. Área 2 – Modelo conceitual e resultados.

- Modelo conceitual: apresenta uma figura para auxiliar o usuário na identificação dos dados de entrada. A figura é atualizada de acordo com o modelo conceitual selecionado.
- Resultados: apresenta os resultados das saturações, frente de migração, volume, diâmetro, saturações água/LNAPL e volume na poça.

Acima da área de trabalho se encontra a barra de menus e barra de ícones de atalho, conforme as Figuras 2.24 e 2.25.

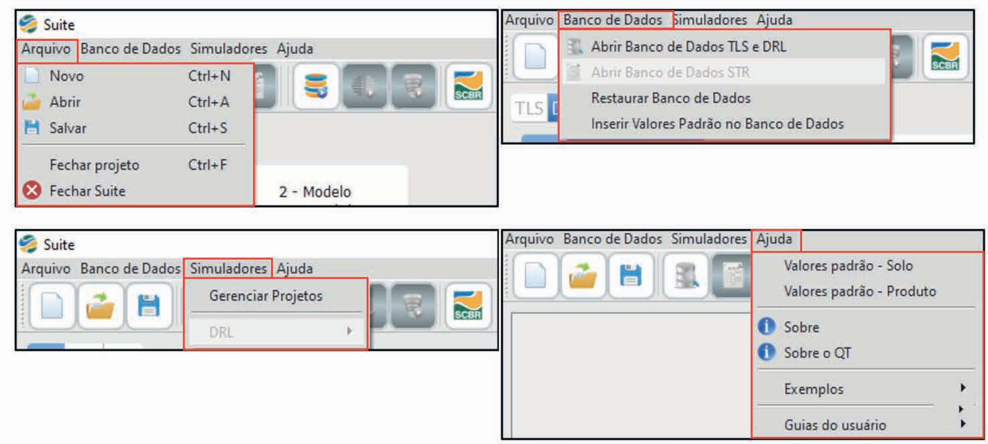


Figura 2.24. Opções da barra menus.

As principais funcionalidades da barra de menus incluem:

1. "Arquivo":

   a. Novo: cria um novo projeto;

   b. Abrir: abre um projeto existente;

   c. Salvar: salva o projeto atual;

   d. Fechar projeto: fecha o projeto atual e retorna para a interface inicial do SUITE;

   e. Fechar SUITE: fecha o *software* SUITE;

2. "Banco de Dados":

   a. Abrir banco de dados TLS e DRL: abre o banco de dados de solos e produtos cadastrados;

   b. Abrir banco de dados STR: abre o banco de dados de técnicas de remediação;

   c. Restaurar banco de dados: restaura o banco de dados para a versão inicial;

   d. Inserir Valores Padrão no Banco de Dados: insere os valores de solos e produtos padrão do SUITE;

3. "Simuladores":

   a. Gerenciar projetos: permite a exclusão de projetos e/ou edição de informações;

   b. DRL: permite exportar os resultados das simulações do DRL;

4. "Ajuda":

   a. Valores padrão – Solo: apresenta um documento com informações de valores de referência para solos;

   b. Valores padrão – Produto: apresenta um documento com informações de valores de referência para produtos;

c. Sobre: apresenta informações sobre a versão do *software* e contatos;

d. Sobre o QT: apresenta informações sobre a biblioteca de programação utilizada;

e. Exemplos: dá acesso a exemplos hipotéticos para cada simulador (TLS, DRL e STR);

f. Guias do usuário: dá acesso aos documentos dos guias do usuário de cada *software* (TLS, DRL e STR).

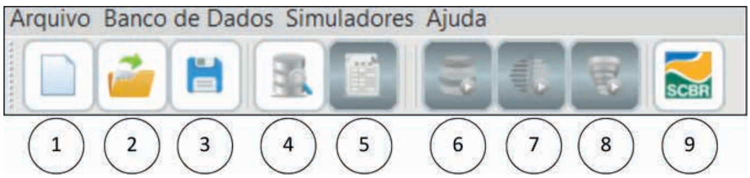


Figura 2.25. Barra de menus e barra de ícones de atalho.

As principais funcionalidades da barra ícones de atalho são:

1. Novo: cria um novo projeto (TLS, DRL ou STR) em branco para o usuário começar a trabalhar;

2. Abrir: abre um projeto existente (TLS, DRL ou STR), permitindo ao usuário visualizar e editar seu conteúdo;

3. Salvar: salva o projeto atual, gravando as alterações feitas;

4. Editor de Banco de Dados TLS e DRL: abre o Editor de Banco de Dados do TLS e DRL, permitindo a visualização e alteração dos valores de solos, produtos e áreas cadastradas. Esse ícone só fica ativo quando um projeto do TLS ou DRL está em andamento;

5. Banco de Dados STR: abre o Banco de Dados do STR, permitindo a visualização das técnicas de remediação disponíveis e seus parâmetros considerados. Esse ícone só fica ativo quando um projeto do STR está em andamento;

6. Executar TLS: executa a simulação dos dados de entrada informados no TLS e apresenta os resultados simulados;

7. Executar DRL: executa a simulação dos dados de entrada informados no DRL e apresenta os resultados simulados;

8. Executar STR: executa a simulação dos dados de entrada informados no STR e apresenta os resultados simulados;

9. SCBR: inicia a aplicação do *software* Solução Corretiva Baseada no Risco (SCBR). Para essa função é necessário ter a ferramenta instalada em seu computador e selecionar o caminho que a aplicação se encontra. O caminho padrão é *C:\Program Files (x86)\Petrobras\SCBR 3.25.0*

2.5 Etapas da simulação

O TLS contempla três etapas de simulação que podem ser observadas na Figura 2.26 e são discutidas com mais detalhes a seguir.

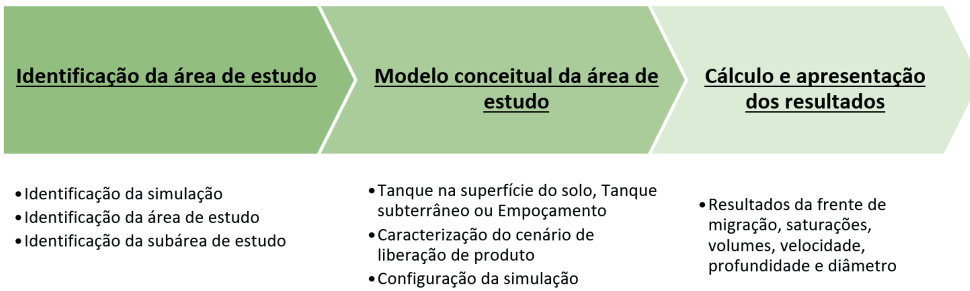


Figura 2.26. Etapas da simulação no TLS.

2.6 Identificação da área de estudo

A primeira etapa da simulação com o TLS consiste na identificação da área de estudo. Para isso, selecione a aba “1 – Identificação da área de estudo” localizada no canto superior esquerdo (Figura 2.27).

Nesta etapa, devem ser preenchidas informações a respeito da simulação, como o título do projeto, o responsável técnico e a localização da área e da subárea (se houver). No item “Identificação da Área → Nome da Área”, podem ser selecionadas as áreas de estudo previamente cadastradas no banco de dados, ao clicar na seta localizada no canto direito (Figura 2.27). Também é possível clicar no ícone de localização e efetuar um novo cadastro de área e subáreas no banco de dados.

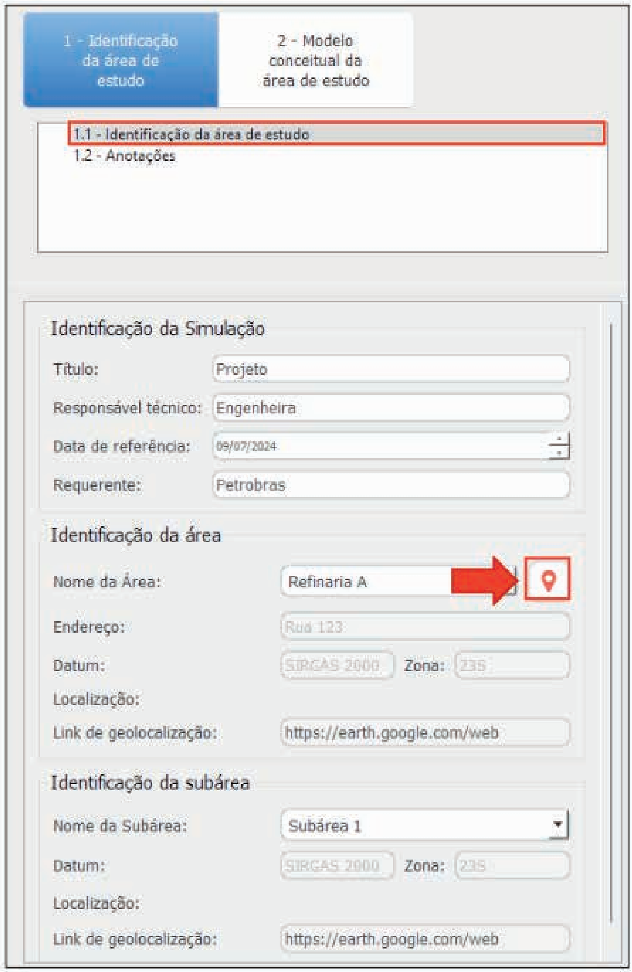


Figura 2.27. Identificação da área de estudo.

O campo “Anotações” permite que o usuário insira informações úteis à simulação, para posterior consulta (Figura 2.28).

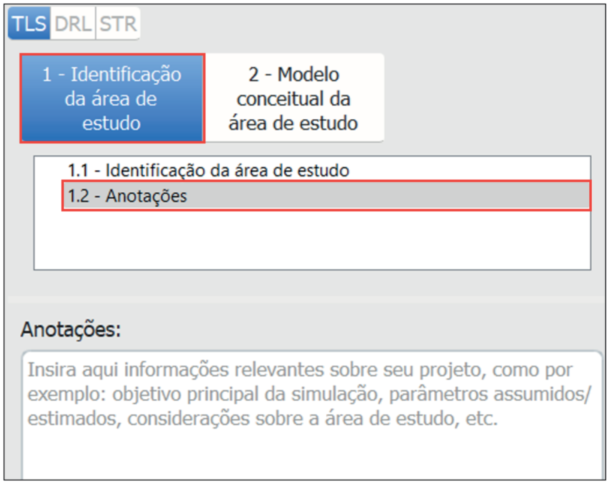


Figura 2.28. Campo para anotações.

2.7 Modelo conceitual da área de estudo

Após a identificação da área de estudo, o usuário deve clicar em “Modelo conceitual da área de estudo” para inserir as demais informações necessárias (Figura 2.29).

2.7.1 Modelo conceitual

Primeiramente, é necessário definir a origem do vazamento: Tanque na superfície do solo, Tanque subterrâneo ou Empoçamento (Figura 2.29). Ao clicar em cada opção, o usuário pode observar na Área 2 uma representação visual de cada um dos modelos (Figura 2.30).

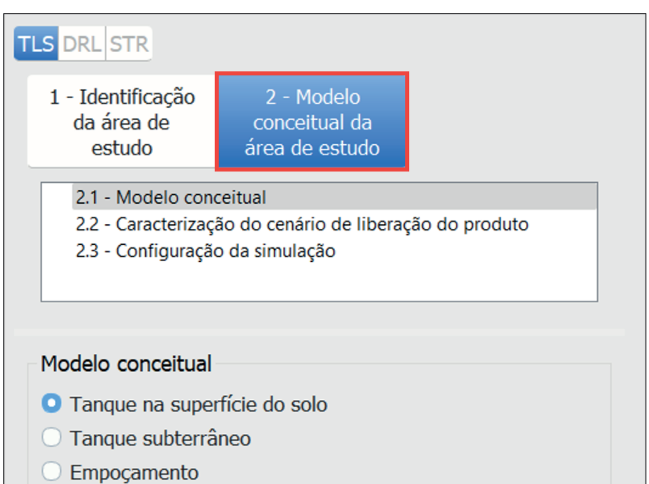


Figura 2.29. Seleção do modelo conceitual.

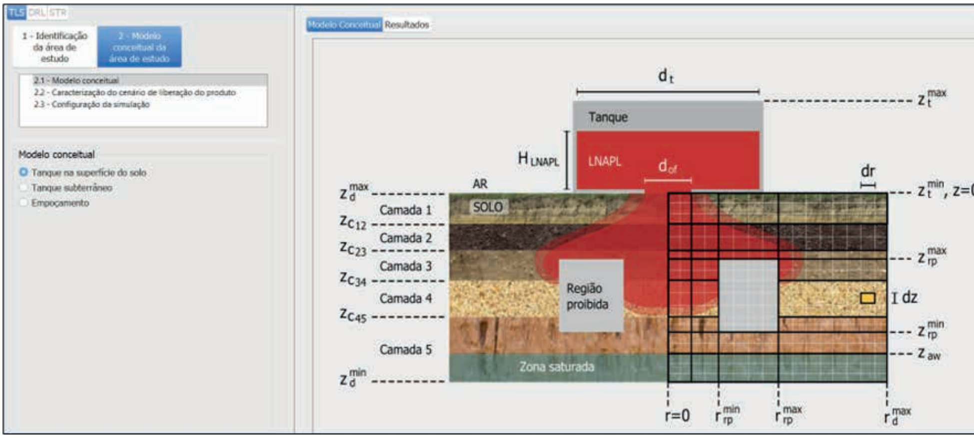


Figura 2.30. Representação do modelo conceitual de um tanque na superfície do solo.

2.7.2 Caracterização do cenário de liberação do produto

Nessa etapa, os dados de caracterização do cenário a ser simulado devem ser inseridos. Ao deixar o cursor do mouse sobre os parâmetros solicitados na interface, uma descrição do parâmetro e os limites numéricos aceitos são exibidos. Os dados necessários incluem: **dados da fonte, correção dielétrica, caracterização do contaminante e caracterização do meio poroso**. A seguir, são apresentados mais detalhes a respeito das informações necessárias.

- **Dados da fonte**

Os dados da fonte variam de acordo com o modelo conceitual escolhido anteriormente (Figura 2.29). Para o "Tanque na superfície do solo" e "Tanque subterrâneo" deve ser inserida a altura inicial de LNAPL no tanque, o diâmetro interno no tanque de LNAPL, o diâmetro do orifício de saída do LNAPL, as coordenadas verticais do tanque e a profundidade do lençol freático (Figura 2.31a). Para o modelo de Empoçamento, *é necessário a* altura do empoçamento de LNAPL, diâmetro do empoçamento de LNAPL e profundidade do lençol freático (Figura 2.31b). Todos estes parâmetros são indicados visualmente na imagem representativa do modelo conceitual, localizada na Área 2 (Figura 2.32).

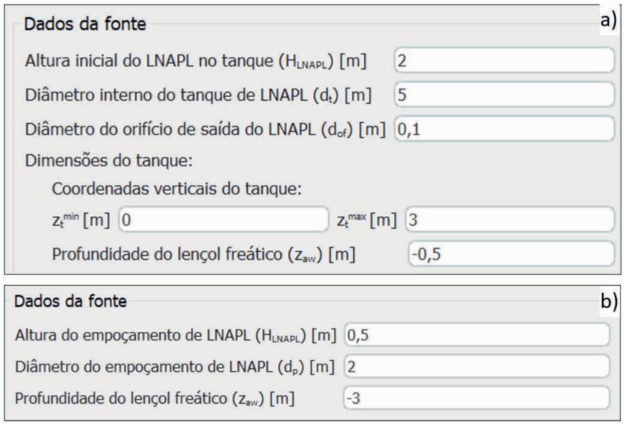


Figura 2.31. Dados da fonte: a) tanque superficial e subterrâneo b) empoçamento.

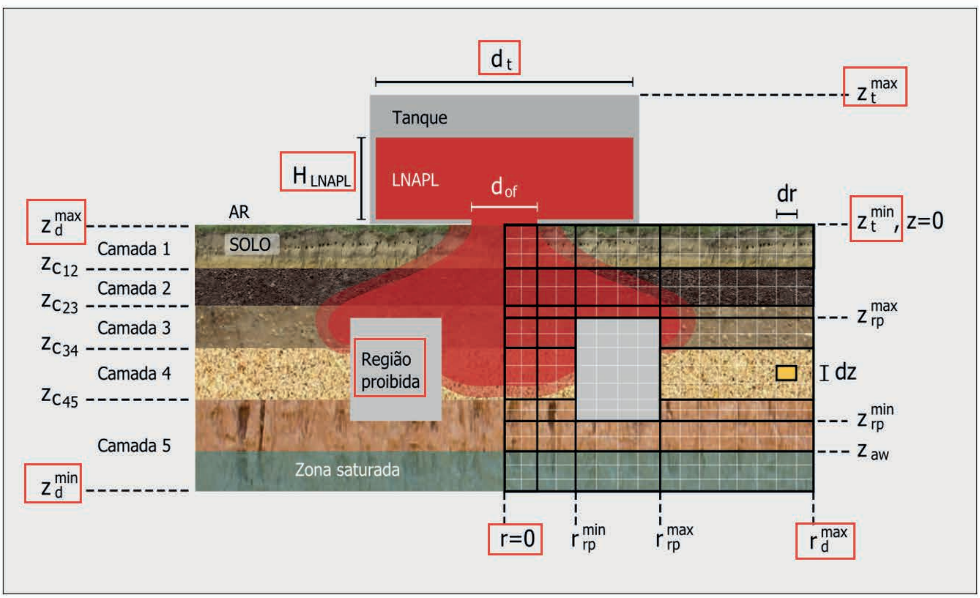


Figura 2.32. Modelo conceitual do tanque na superfície do solo.

- **Correção dielétrica**

O usuário deve escolher se a simulação será realizada considerando ou não o efeito da interação elétrica do solo com o produto (Figura 2.33). Para mais informações sobre quando considerar este efeito, consulte o Item 3.3.

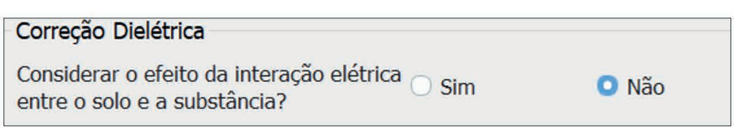


Figura 2.33. Correção dielétrica.

- **Caracterização do contaminante**

Nessa etapa, o usuário deve selecionar o tipo de LNAPL responsável pela contaminação através da seta indicada no campo "LNAPL" (Figura 2.34). As informações serão automaticamente preenchidas, de acordo com o que foi cadastrado no banco de dados. Caso seja necessário editar ou adicionar um novo produto, basta clicar no botão de engrenagem ao lado, que redirecionará para o banco de dados (Figura 2.34).

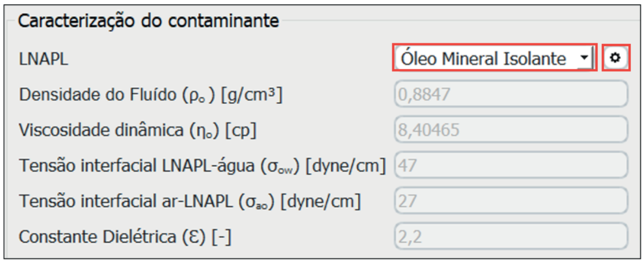


Figura 2.34. Caracterização do contaminante.

- **Caracterização do meio poroso**

Para caracterizar o meio poroso, o usuário deve selecionar um tipo de solo já cadastrado no banco de dados no campo "Solo". Ou, então, clicar na engrenagem para editar ou adicionar um novo solo no banco de dados (Figura 2.35). Ao escolher um tipo de solo cadastrado, as informações constantes no banco de dados serão automaticamente preenchidas. A condutividade hidráulica deve ser preenchida com dados obtidos experimentalmente no local de estudo, observando os limites-padrão estipulados no *software* (Figura 2.35). O índice de plasticidade do solo também deve ser preenchido, caso o usuário tenha optado por considerar o efeito da correção dielétrica. No caso da Figura 2.35, o "Índice de Plasticidade" não foi inserido, pois a correção dielétrica não foi considerada, dada a natureza do meio poroso (Figura 2.33). No Item 4 é apresentado um exemplo no qual a correção dielétrica e o índice de plasticidade são considerados.

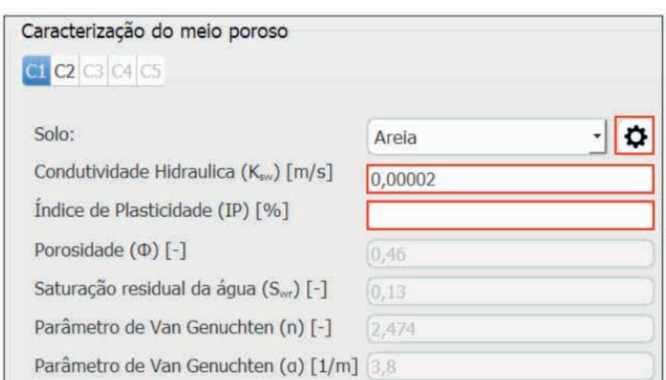


Figura 2.35. Caracterização do meio poroso.

2.7.3 Configuração da simulação

Nesta etapa, os dados a serem preenchidos incluem: **parâmetros temporais, dimensões do domínio de simulação, geometria das regiões proibidas, dimensões da célula do grid, diretório e configurações avançadas,** os quais são detalhados a seguir.

- **Parâmetros temporais**

Devem ser inseridos: Tempo máximo de passo, Tempo mínimo entre frames, Tempo final e Duração da abertura (Figura 2.36), sendo este último obrigatório somente para os modelos “Tanque na superfície do solo” e “Tanque subterrâneo”. Para mais informações sobre a definição desses parâmetros, consulte o Item 3.6.

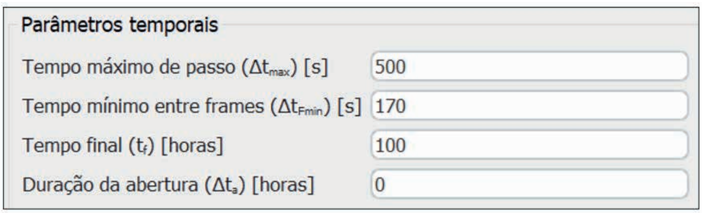


Figura 2.36. Parâmetros temporais.

- **Dimensões do domínio de simulação**

O domínio de simulação deve ser definido através de um raio máximo e elevação mínima. O raio mínimo do domínio de simulação e a elevação máxima do domínio de simulação são iguais a zero por padrão, e o usuário deve inserir somente o raio máximo do domínio de simulação (r_d^{max}) e a elevação mínima do domínio de simulação (z_d^{min}) (Figura 2.37). Essas dimensões podem ser observadas visualmente na Figura 2.32.

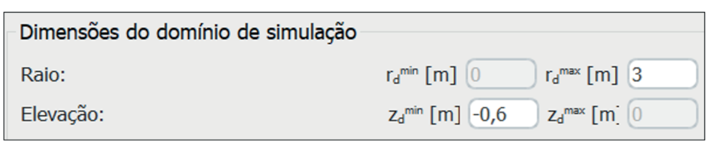


Figura 2.37. Dimensões do domínio de simulação.

- **Geometria das regiões proibidas**

As regiões proibidas representam espaços impenetráveis pelo fluido (Figura 2.32). Esse parâmetro não é de preenchimento obrigatório. Para adicionar uma região proibida, o usuário deve primeiramente inserir o “Número de regiões proibidas” e, então, a geometria das mesmas: Elevação mínima da região proibida, Elevação máxima da região proibida, Raio mínimo da região proibida e Raio máximo da região proibida, conforme Figura 2.38.

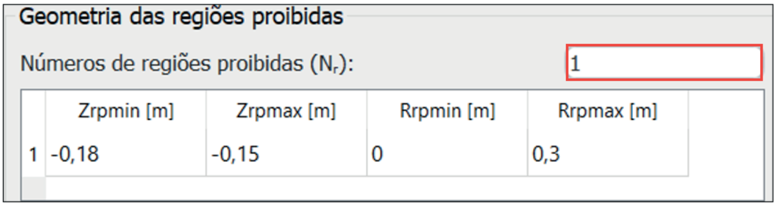


Figura 2.38. Geometria das regiões proibidas.

- **Dimensões da célula do grid**

As dimensões da célula do grid (*dr* e *dz*) devem ser definidas a fim de obter-se uma malha de tamanho adequado ao problema. O usuário deve informar um valor para o *dr,* que representa a máxima diferença entre o raio externo e raio interno do volume elementar e o *dz,* que representa a máxima diferença entre a elevação superior e a elevação inferior do volume elementar (Figura 2.39). Para mais informações sobre como definir as dimensões da célula do grid, consulte o Item 3.8.

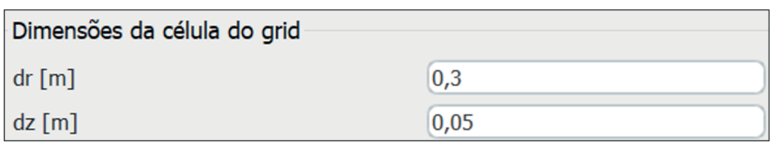


Figura 2.39. Dimensões da célula do grid.

- **Diretório**

O usuário deve informar o local em que os resultados da simulação serão salvos, clicando no ícone em destaque na Figura 2.40.

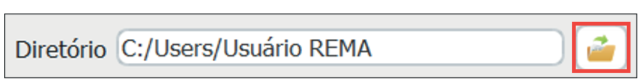


Figura 2.40. Seleção do diretório para salvar os resultados.

- **Configurações avançadas**

Nessa etapa, o usuário pode alterar as tolerâncias nominal e excepcional (Figura 2.41). Esse recurso só é recomendado em alguns casos específicos e para usuários avançados. A tolerância nominal representa a diferença média aceitável entre as pressões hidrostáticas (em metros) das soluções implícitas de primeira e segunda ordem. Valores menores implicam em uma maior precisão e maior custo computacional. A tolerância excepcional determina o intervalo da fração da tolerância nominal no qual o erro é aceitável, que é dado por $[(1 - tol_e) * tol_n, (1 + tol_e) * tol_n]$.

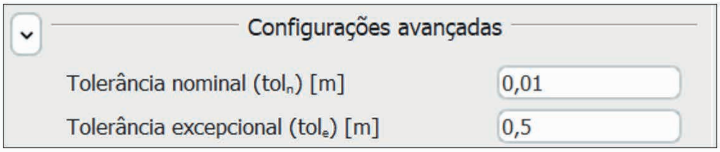


Figura 2.41. Configurações avançadas padrão.

2.7.4 Execução da simulação

Após inserir todos os dados de entrada necessários, o usuário pode executar a simulação do TLS. Para isso, deve-se selecionar o ícone "Executar TLS", localizado no canto superior da tela (Figura 2.42).



Figura 2.42. Executar TLS.

2.7.5 Resultados do TLS

Os resultados da simulação são apresentados na Área 2 (Figura 2.43), incluindo gráficos e valores para saturações, volumes, velocidade, profundidade e diâmetro. A seguir, cada resultado, referente ao modelo conceitual "Tanque subterrâneo" é detalhado.

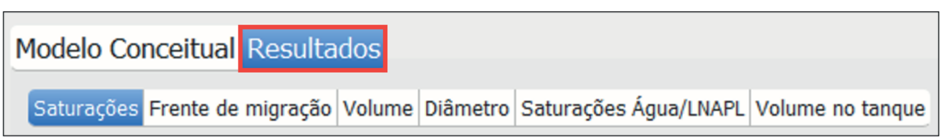


Figura 2.43. Resultados do TLS.

Saturações: são apresentados os resultados de saturação de LNAPL e água ao longo da profundidade, ao longo tempo. Ao lado direito da tela, o usuário encontra uma série de ferramentas para observação da saturação de LNAPL e água ao longo do tempo previamente escolhido, podendo alterar a transparência das saturações, a interpolação, a presença da malha e de *layers* e a opção de deslocar/refletir (Figura 2.44). O tempo de simulação é controlado pela barra de rolagem em destaque na Figura 2.44. Para alterá-lo, basta movimentar a barra que inicia no tempo igual 0 a $t_{máx}$ (tempo final da simulação, estipulado pelo usuário anteriormente), ou então aumentar o tempo do Frame atual por meio das setas. As ferramentas que o usuário pode alterar incluem:

- *Layers*: quando desativado, oculta a linha ou linhas que indicam as camadas de solo.

- <u>Deslocar/refletir</u>: quando desativado, mostra os resultados a partir do raio da geometria da fonte de LNAPL. Ao ativar, o raio é refletido de maneira simétrica e o usuário pode observar a fonte inteira.

- <u>Malha</u>: quando desativada, oculta a malha quadriculada/retangular que corresponde ao grid.

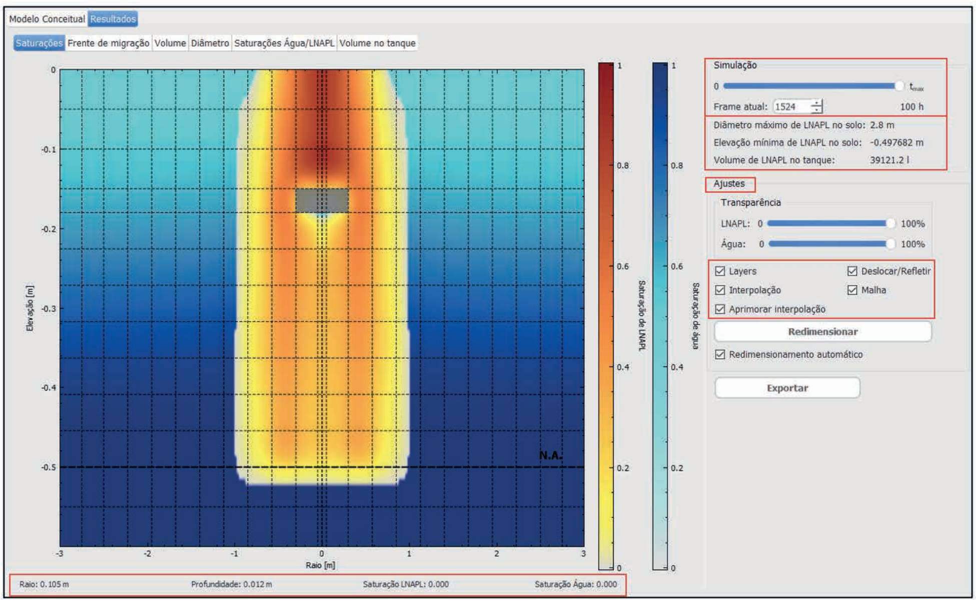


Figura 2.44. Resultados de saturação de produto e ferramentas para visualização.

- <u>Interpolação e interpolação aprimorada</u>: as saturações apresentadas no resultado final podem ser visualizadas de maneira interpolada ou não. Quando o usuário opta pela não interpolação, a saturação é apresentada com base em cada grid, conforme a Figura 2.45. Caso a saturação seja interpolada, o resultado é suavizado (Figura 2.46). Em alguns casos, é possível que haja uma descontinuidade na saturação, implicando em regiões vazias na pluma de LNAPL (Figura 2.46). Essa situação é uma falha na visualização e não representa os resultados reais. Nesses casos, o usuário pode utilizar a interpolação aprimorada para melhorar a visualização do resultado (Figura 2.47). Todavia, essa função do TLS deixa a simulação mais lenta. Portanto, a interpolação aprimorada só é recomendada em caso de simulações que apresentem descontinuidades na saturação de LNAPL.

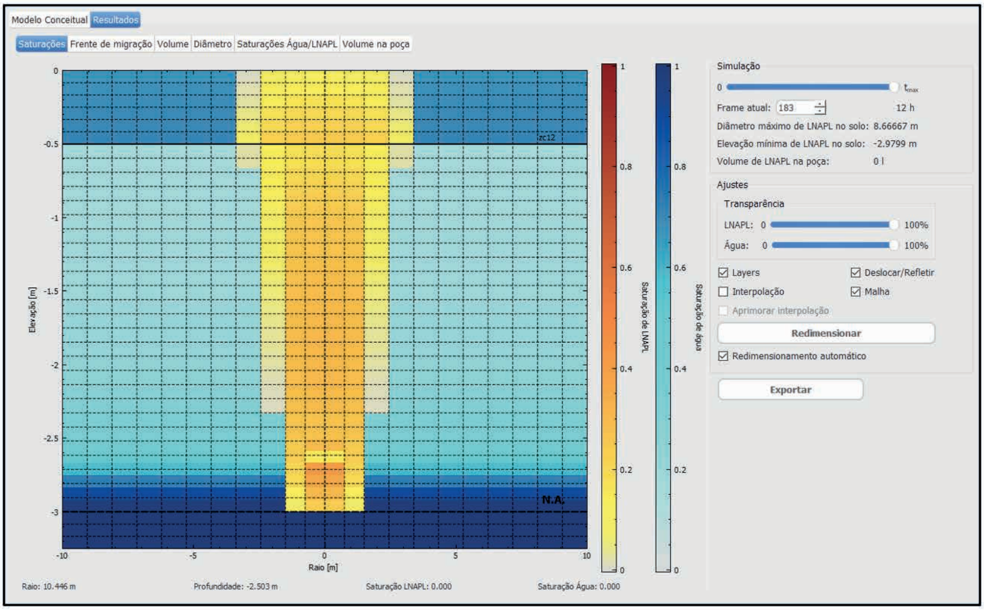


Figura 2.45. Saturação de LNAPL sem interpolação.

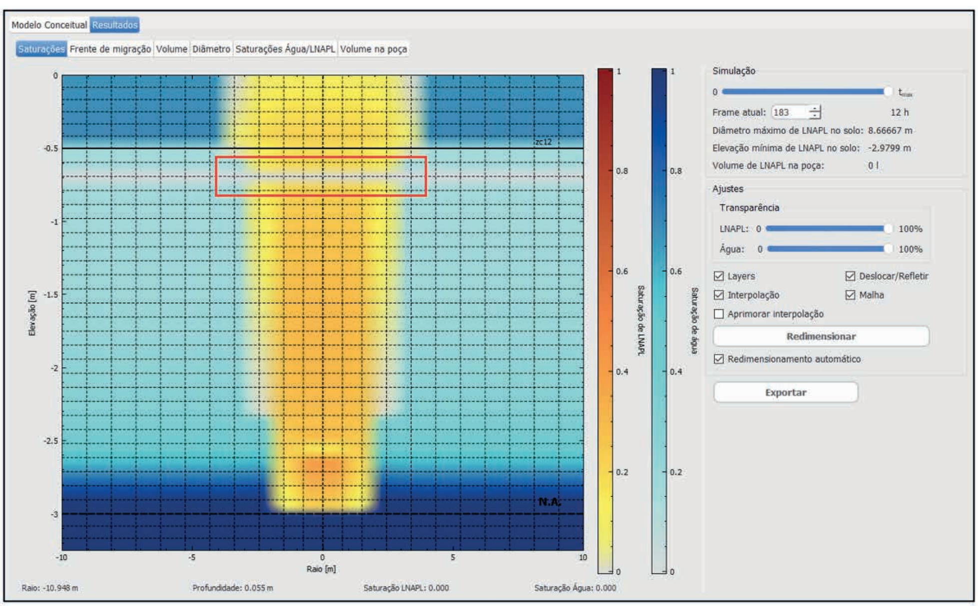


Figura 2.46. Saturação de LNAPL com interpolação ativada e com trecho de descontinuidade.

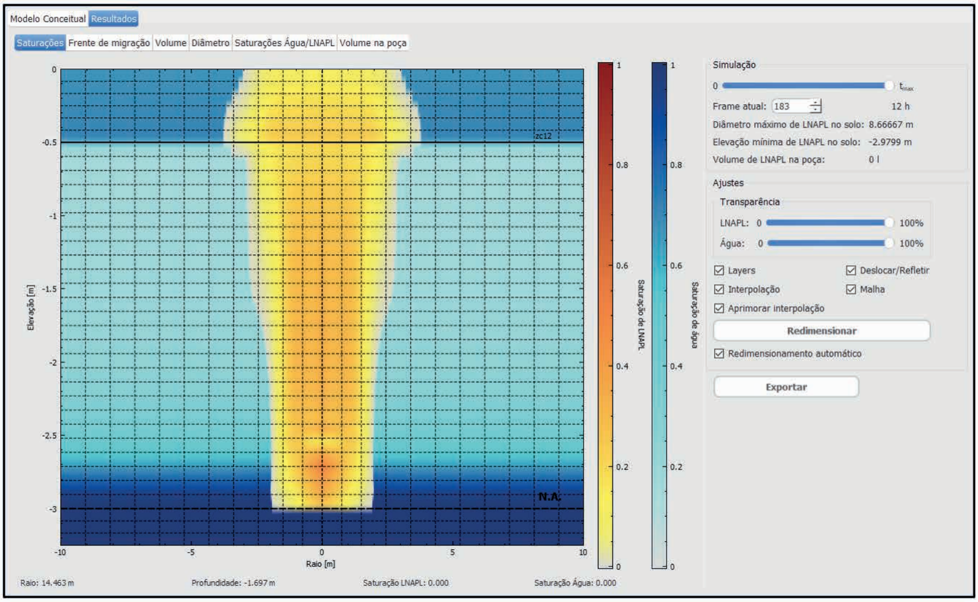


Figura 2.47. Saturação de LNAPL com interpolação aprimorada.

Ainda ao lado direito (Figura 2.44), é possível observar o "Diâmetro máximo de LNAPL no solo", a "Elevação mínima de LNAPL no solo" e o "Volume de LNAPL no tanque/ poça", variando conforme o tempo escolhido. Abaixo do gráfico de saturações, o usuário pode visualizar o raio, a profundidade e as saturações, através da movimentação do cursor do *mouse*.

Frente de migração: representa a variação da profundidade do produto ao longo do tempo (Figura 2.48). Esse resultado pode ser exportado para uma planilha eletrônica através do botão "Exportar", localizado no canto inferior esquerdo.

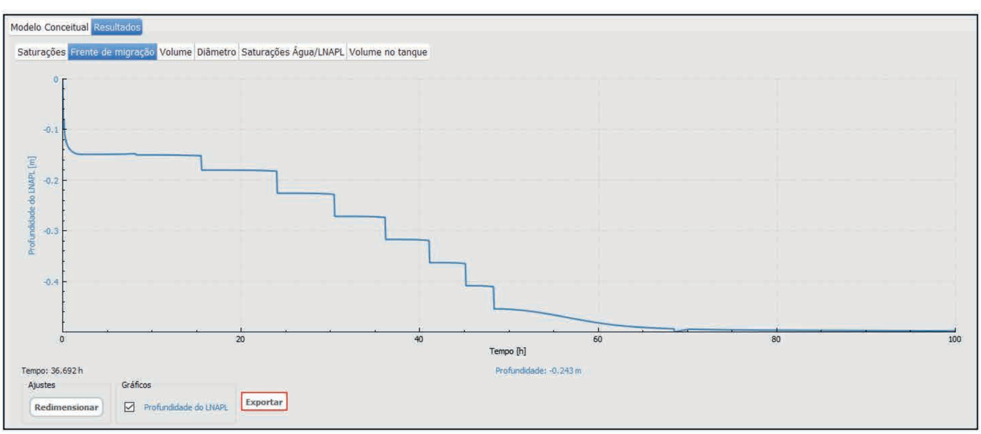


Figura 2.48. Resultado da frente de migração.

Volume: Nessa aba, encontra-se o gráfico do volume de LNAPL por profundidade e volume de LNAPL acumulado por profundidade. É possível mudar a exibição das curvas que aparecem no gráfico, selecionando-as na parte inferior (Figura 2.49). O tempo de simulação pode ser alterado, por meio da barra de rolagem no canto inferior esquerdo. Os resultados para o tempo selecionado podem ser exportados para uma planilha eletrônica ao clicar em “Exportar frame atual”.

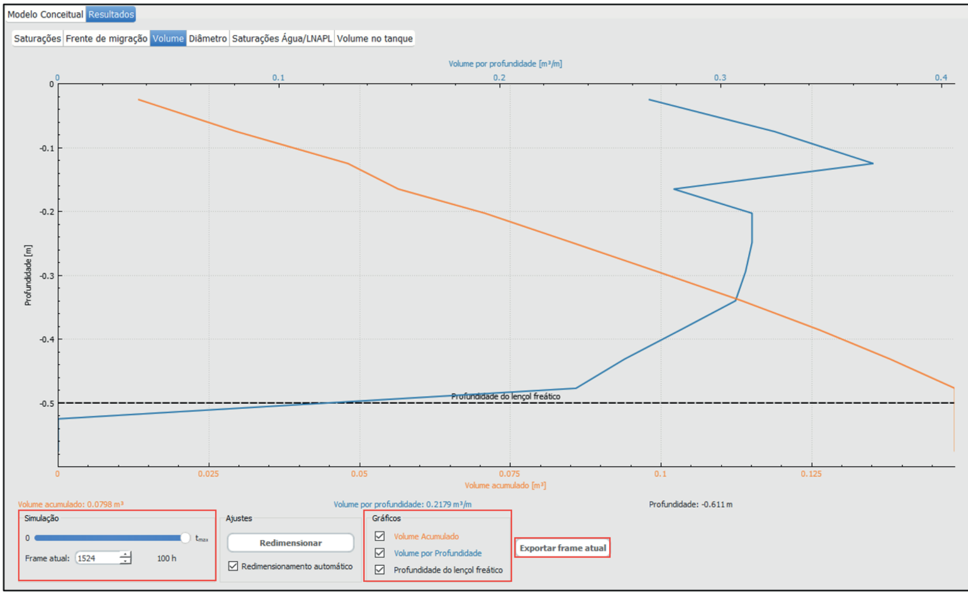


Figura 2.49. Resultados de volume de produto por profundidade.

Diâmetro: Este gráfico mostra a relação da profundidade pelo diâmetro máximo de LNAPL. Mais uma vez, há a presença de uma barra de rolagem no canto inferior esquerdo que possibilita a visualização desses dois fatores ao longo do tempo (Figura 2.50) e os resultados para o tempo selecionado podem ser exportados para uma planilha eletrônica.

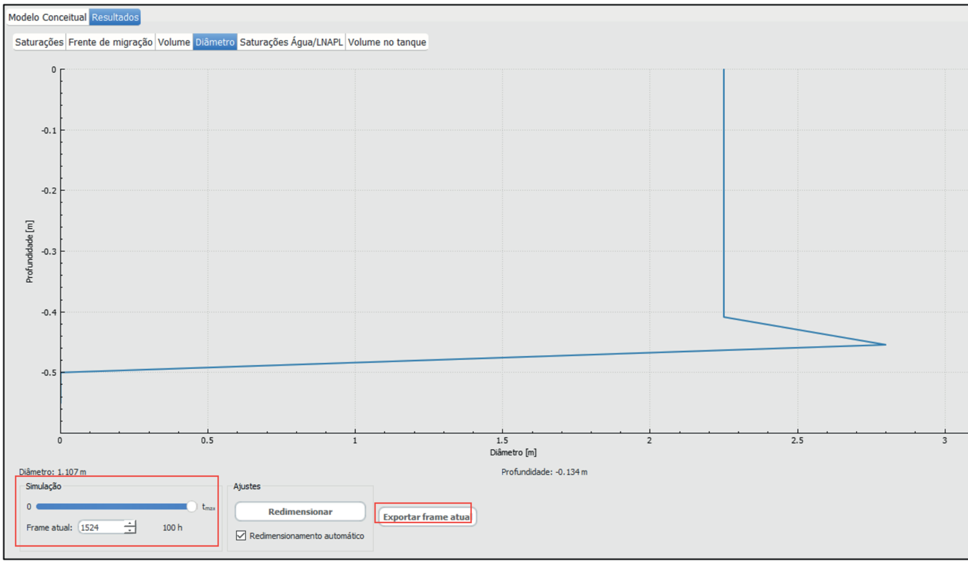


Figura 2.50. Resultados do diâmetro de LNAPL ao longo da profundidade.

Saturações de água/LNAPL: Neste item, o usuário pode observar a variação das saturações de água e de LNAPL ao longo da profundidade, tendo como referencial a elevação do lençol freático, conforme a Figura 2.51. Os resultados para o tempo selecionado podem ser exportados para uma planilha eletrônica.

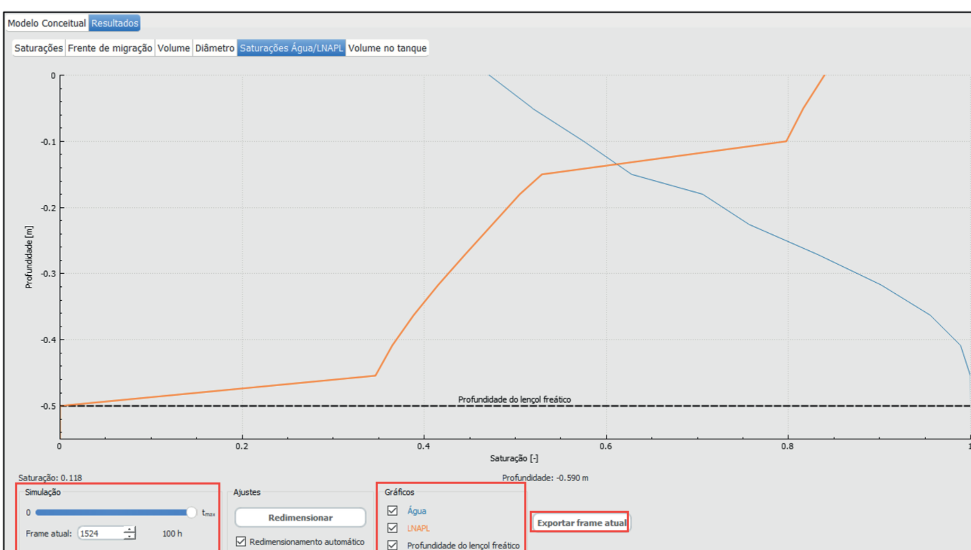


Figura 2.51. Resultados de saturações de água/LNAPL ao longo da profundidade.

Volume no tanque: Este gráfico apresenta a variação do volume de contaminante no tanque ou poça, em função do tempo final da simulação (Figura 2.52). Os resultados podem ser exportados para uma planilha eletrônica ao clicar em “Exportar”.

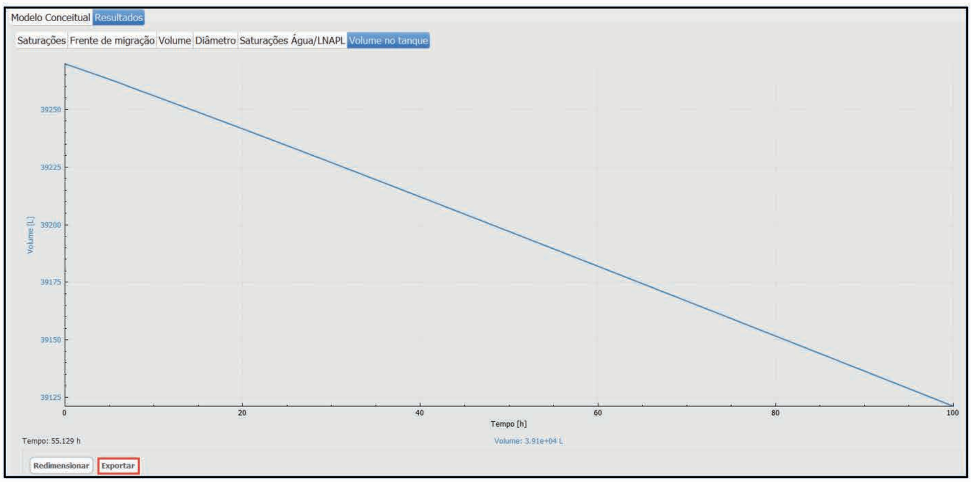


Figura 2.52. Volume de produto no tanque/poça.

3 PERGUNTAS FREQUENTES

3.1 Como salvar e compartilhar os projetos do SUITE?

Os projetos executados no SUITE ficam armazenados em arquivos com extensão *".db*", criados sempre ao inicializar o *software*, conforme descrito no Item 2.1. Para compartilhar os dados de entrada utilizados na simulação, incluindo as áreas e subáreas cadastradas, os solos e os produtos inseridos no banco de dados, basta compartilhar o arquivo com extensão *.db* de interesse.

Sugere-se que, ao criar o banco de dados, o usuário nomeie o arquivo com informações que facilitem sua identificação. O prefixo "BD" pode ser inserido para remeter ao arquivo do banco de dados. Também podem ser inseridas informações sobre o responsável técnico e a data de criação do banco de dados, conforme o exemplo descrito na Figura 3.1.

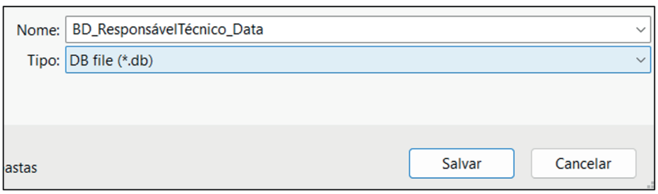


Figura 3.1. Sugestão de identificação do arquivo extensão *.db.*

Ressalta-se que este arquivo possui atualização automática; ou seja, ao longo da simulação, as alterações feitas serão registradas. Caso o usuário deseje abrir uma simulação realizada anteriormente em um banco de dados existente, ao abrir o SUITE, deverá clicar em "Carregar banco de dados" e selecionar o arquivo *.db* no qual a simulação foi previamente criada (Figura 3.2).

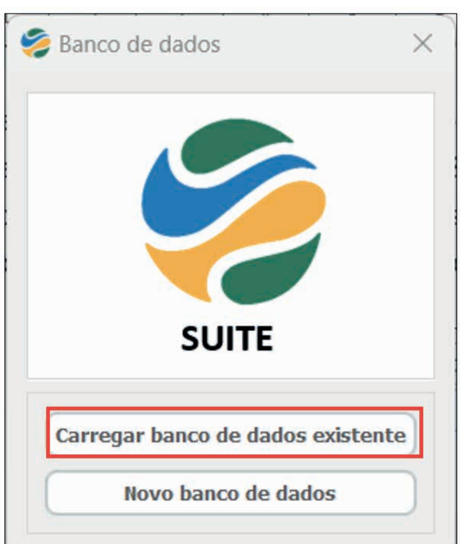


Figura 3.2. Seleção de banco de dados criado previamente.

3.2 É possível exportar os resultados obtidos?

Sim, os resultados podem ser exportados. Na Área 2, em “Resultados Saturações”, há o botão “Exportar” localizado no lado direito (Figura 3.3), que possibilita que o usuário exporte uma tabela em Excel com dados de frames, tempo, raio, elevação, saturação de LNAPL, saturação de água, pressão de LNAPL e pressão de água. Porém, dependendo do tamanho da simulação, a quantidade de dados exportados será alta, tendo em vista que o simulador é numérico. Dessa forma, essa opção é recomendada para um usuário avançado, sendo aconselhável que o usuário utilize essa função apenas com caráter auxiliar, uma vez que os dados principais de saída são os gráficos apresentados diretamente na interface do TLS.

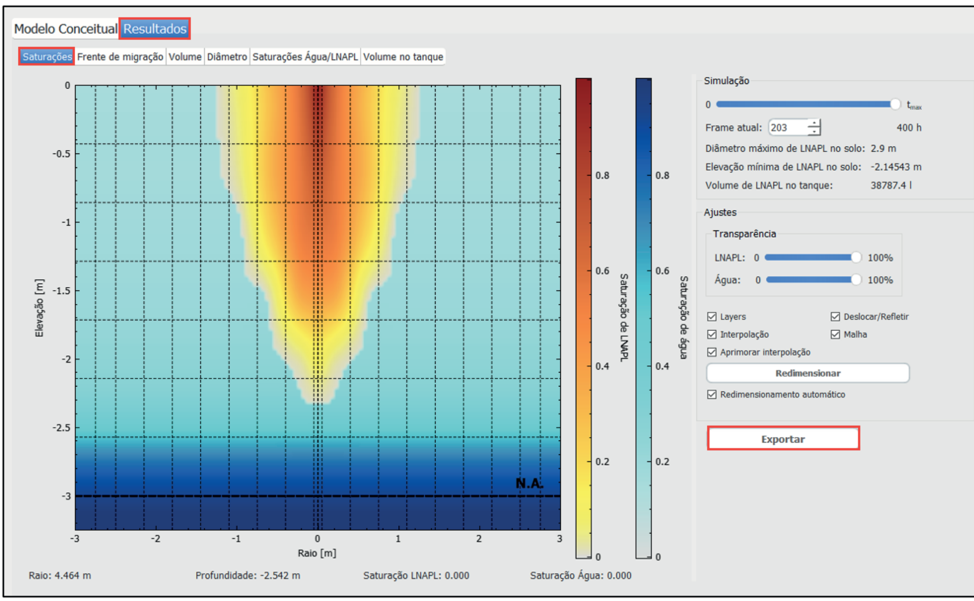


Figura 3.3. Exportar resultados obtidos.

Também é possível exportar os resultados utilizados para gerar os gráficos das abas “Frente de migração”, “Volume”, “Diâmetro”, “Saturações Água/LNAPL” e “Volume no tanque/poça”. Basta selecionar a aba de interesse e clicar no botão “Exportar” localizado do canto inferior direito, conforme mostra a Figura 3.4.

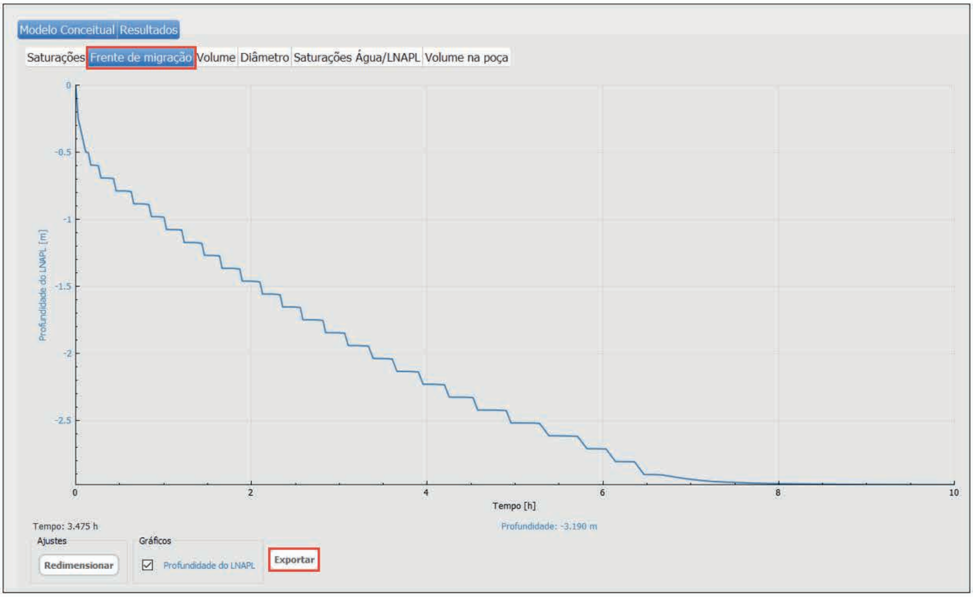


Figura 3.4. Botão para exportar dados gerados pelos gráficos de resultados.

3.3 Quando considerar a correção dielétrica?

A correção dielétrica é solicitada no campo "Caracterização do cenário de liberação do produto", logo após os "Dados da fonte". É recomendado considerar o efeito da interação elétrica entre o solo e a substância, uma vez que a permeabilidade do solo pode ser corrigida pela polaridade da substância e da plasticidade do solo.

Estudos realizados por Budhu *et al.* (1991), Oliveira (2001), Amorim Júnior (2007), Cardoso (2011) e Machado *et. al.* (2016) demonstraram que a mobilidade dos fluidos em solos argilosos pode ser influenciada pela interação elétrica entre os argilominerais presentes em solos expansivos (ex.: montmorilonita e vermiculita) e os fluídos polares, tal como a água, dependendo da constante dielétrica (ε). Os autores concluíram que, em relação à água (ε=80), as condutividades hidráulicas ao LNAPL na zona não saturada podem ser superiores em até três ordens de magnitude quando o LNAPL é um composto apolar, como, por exemplo, óleo diesel (ε = 2,13), tetracloreto de carbono (ε = 2,20) e gasolina pura (ε = 2,07). Ou seja, a constante dielétrica dos fluidos pode afetar a condutividade hidráulica em solos argilosos expansivos. Quando um fluido polar (ex.: água) possui afinidade com o argilomineral, ele tende a ficar retido no solo argiloso, não somente pela densidade e viscosidade, mas também devido às ligações moleculares, diminuindo a condutividade hidráulica. O inverso ocorre com os fluidos apolares (ex.: petróleo, gasolina, óleo diesel e óleo mineral) que apresentam baixa constante dielétrica.

Cardoso (2011), Machado *et al.* (2016) e Corseuil *et al.* (2020) demonstraram que, a partir do índice de plasticidade (IP) do solo, é possível obter uma estimativa sobre a superfície específica do argilomineral e da capacidade de troca catiônica do solo. Logo, a

presença de argilominerais expansivos está diretamente relacionada ao IP, ou seja, quanto maior for o IP, mais expansivo é o solo (CORSEUIL *et al.*, 2020). Portanto, quando for necessário considerar a correção dielétrica, será necessário também que o usuário insira o índice de plasticidade do solo previamente escolhido (Item 3.4).

3.4 Como inserir a plasticidade de um solo?

A equação matemática responsável pela correção dielétrica tem como base as seguintes propriedades do solo e do fluido: índice de plasticidade, saturação da água, condutividade hidráulica da água, densidade, viscosidade e constante dielétrica da água e do óleo (MACHADO *et al.,* 2016). Portanto, considerando a alta relevância das interações elétricas dos fluidos com os solos argilosos expansivos, este fenômeno é considerado no modelamento matemático do TLS.

O índice de plasticidade do solo pode ser obtido através da diferença entre o valor limite de liquidez e o limite de plasticidade (IP = LL - LP), ou seja, é o intervalo de umidade em que o solo se comporta de maneira plástica. O IP será maior quanto maior for a superfície específica do argilomineral, a capacidade de troca catiônica e a quantidade de argila presente no solo.

Para inserir o parâmetro de plasticidade de um solo, basta inserir o valor diretamente na interface, conforme a Figura 3.5.

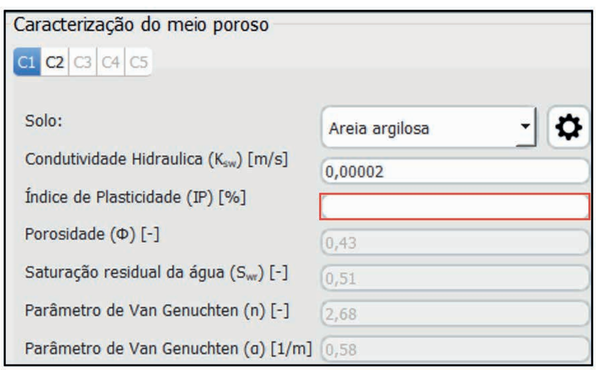


Figura 3.5. Índice de Plasticidade – caracterização do meio poroso.

3.5 O que é o diretório? Posso excluir os arquivos armazenados?

O diretório, campo que se encontra em “Configuração da simulação”, serve para que o TLS armazene os resultados gerados durante a simulação. Assim, mesmo após o usuário fechar o TLS, depois de ter executado uma simulação, ao abri-lo novamente, não será necessário executá-la de novo.

Entretanto, se por acaso o usuário excluir o diretório de alguma simulação, basta executá-la novamente no *software*. Vale ressaltar que, cada vez que se altera um parâmetro da simulação, uma nova pasta é criada no diretório e as novas informações são salvas. Logo, é possível excluir as pastas de simulações anteriores sem causar dano a atual.

3.6 Como definir os parâmetros temporais

Os parâmetros temporais encontram-se no campo "Configuração da simulação" e regulam os tempos de simulação e o tempo de repetições realizadas. É fundamental que eles sejam estipulados adequadamente para a obtenção de resultados coerentes.

- **Tempo máximo de passos:** Representa o intervalo de tempo máximo que o método numérico poderá utilizar. Sempre que possível, o método numérico aumentará o intervalo de tempo, com o objetivo de diminuir o custo computacional. Logo, é aconselhável que o usuário não utilize um número muito perto do limite inferior, pois dificultará a visualização da expansão da pluma.
- **Tempo mínimo entre frames:** Um frame é um instante de tempo em que os valores das pressões e saturações são armazenados na memória. O tempo entre frames não é constante ao longo da simulação. Este parâmetro representa o valor mínimo entre 2 frames. É válido ressaltar que os dados armazenados da simulação variam com o número de frames, quanto menor for o número escolhido nesse parâmetro, menor será o intervalo de simulação, logo, mais dados serão salvos, aumentando o tamanho da simulação.
- **Tempo final:** Representa o tempo total de simulação. Ou seja, o tempo que o usuário deseja observar a movimentação de LNAPL no solo.
- **Duração da abertura:** Representa o intervalo de tempo em que o orifício permanece aberto em tempo de horas. O vazamento acontecerá enquanto houver LNAPL disponível no tanque. Para configurar tempo infinito de abertura do orifício, é necessário deixar o campo em branco.

3.7 Erro de tolerância na simulação e configurações avançadas

Após executar uma simulação, é possível que ocorra um erro onde o usuário não consegue mover a barra de rolagem do tempo (Figura 3.6). Isso acontece pela utilização de valores de tolerância muito restritos no cálculo numérico (Figura 3.7). Para resolver esse problema, o usuário pode alterar a tolerância em "Configurações avançadas" (Figura 3.8), deixando esses valores mais elevados. Entretanto, ressalta-se que ao aumentar a tolerância, a simulação se torna menos precisa, podendo levar menos tempo para ser finalizada.

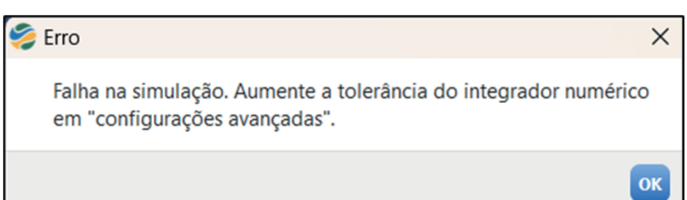


Figura 3.6. Erro de tolerância.

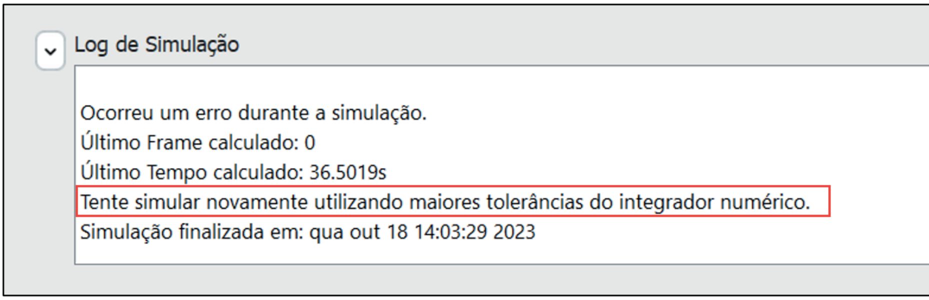


Figura 3.7. Erro de tolerância no Log da simulação.

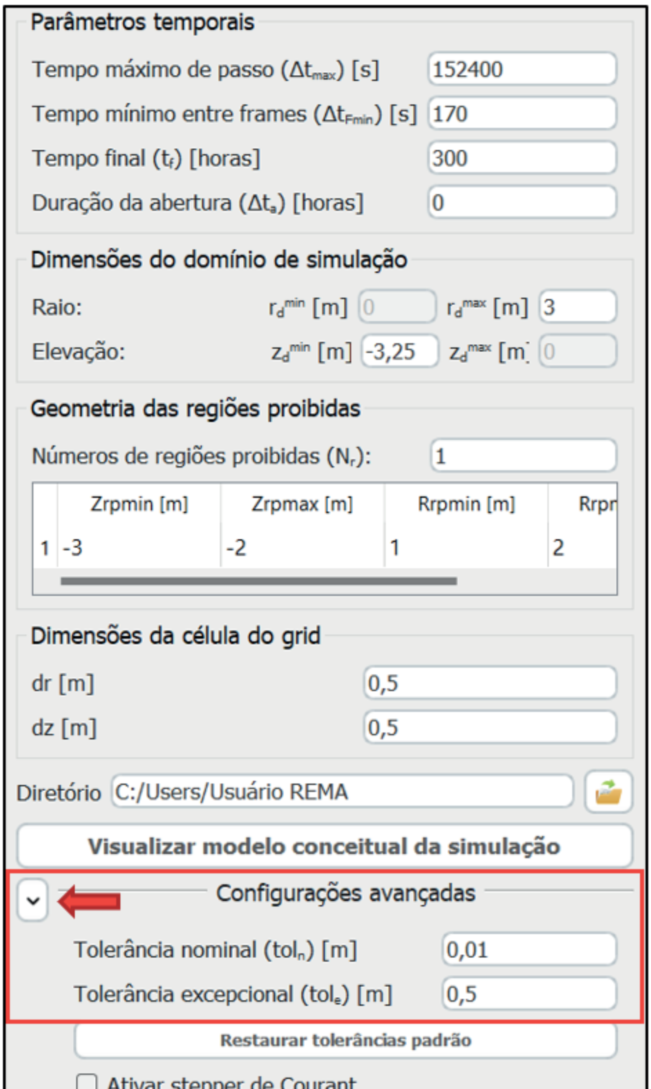
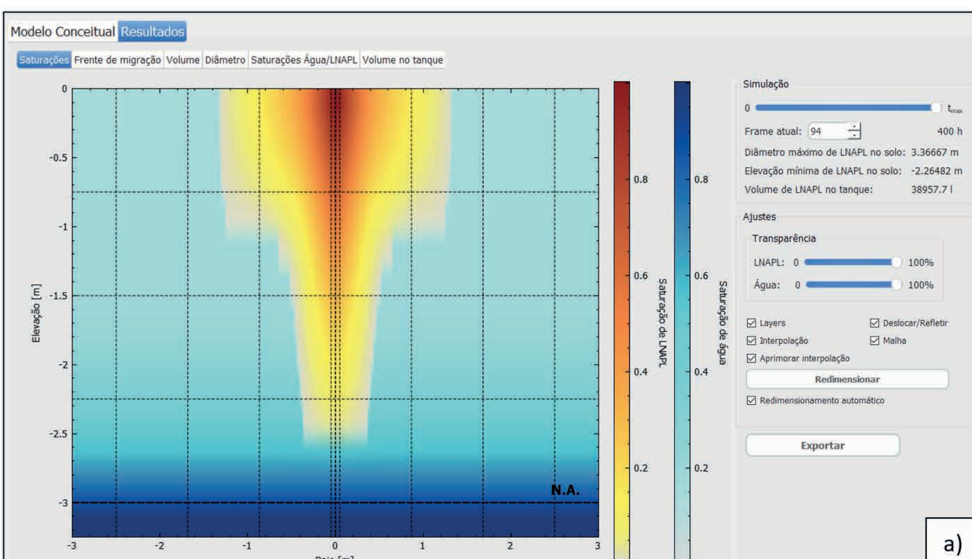


Figura 3.8. Configurações avançadas.

3.8 Como definir as dimensões da célula do grid

As dimensões da célula do grid (*dr* e *dz*) devem ser definidas a fim de obter-se uma malha de tamanho adequado ao problema. Ou seja, quanto maior o *dr* e o *dz*, maior será o grid e, consequentemente, menor será a resolução do problema numérico, já que grids maiores não possibilitam grande precisão da visualização do problema simulado. Logo, um problema de menor escala necessita de uma resolução maior. Quanto menor a malha utilizada, mais detalhados os resultados da simulação serão. Entretanto, esse detalhamento pode ter um alto custo computacional, aumentando o tempo necessário para a simulação.

As Figuras 3.9 a) e b) apresentam as diferenças nos resultados de saturação de LNAPL, ocasionadas pela utilização de diferentes grids. Na Figura 3.9 a) foi utilizado *dr* = *dz* = 1 m, enquanto na Figura 3.9 b) foi utilizado *dr* = *dz* = 0,2 m. Percebe-se que na segunda imagem a visualização das fronteiras do produto é melhor delimitada, devido à melhor resolução definida com o tamanho do grid. Também é possível visualizar que ocorrem diferenças na profundidade atingida pelo LNAPL, para o mesmo tempo de simulação (400 horas). Essas diferenças de profundidades chegam a 0,52 metros. Ou seja, diferentes tamanhos de malha também podem afetar a profundidade atingida pelo contaminante em uma simulação, pois ao refinar a malha é possível visualizar mais detalhadamente o comportamento do LNAPL. Dessa forma, é indicado que sejam realizados testes com diferentes valores de malha, até que se atinjam resultados de profundidade convergentes, para o mesmo tempo. No exemplo de aplicação (item 4), é apresentado um exemplo da escolha da malha para simulação.



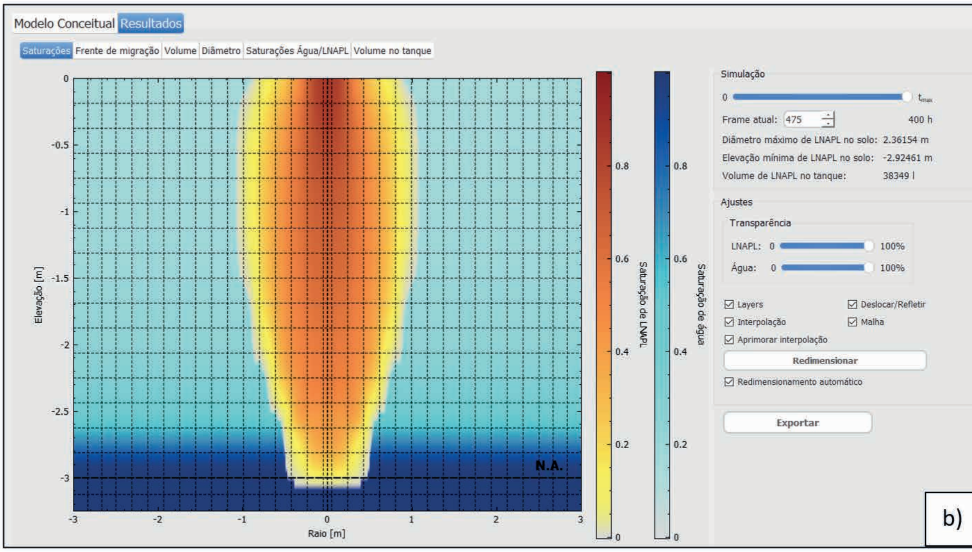


Figura 3.9. Diferença entre dimensões de grid. a) dimensões = 1 metro b) dimensões = 0,2 metros.

3.9 Erro ao importar *template* para Solo ou Produto

Uma mensagem de erro pode aparecer quando o usuário importar um *template* de solo ou produto no banco de dados (Figura 3.10). Se isso ocorrer, o usuário deve rever o *template* e apagar as colunas em excesso. É possível ainda que apareça uma mensagem indicando que o *template* escolhido não corresponde às informações exigidas (Figura 3.11). Novamente, o usuário deve verificar se está importando o *template* correto.

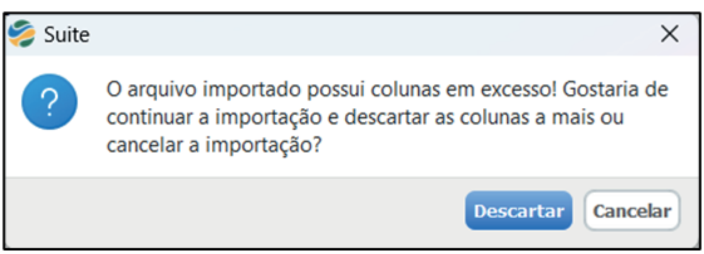


Figura 3.10. Erro 1 de importação de *template.*

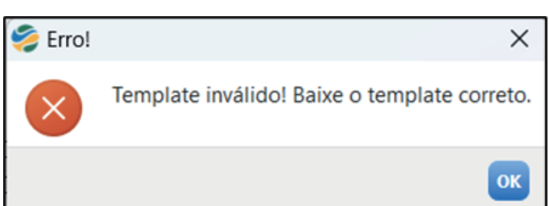


Figura 3.11. Erro 2 de importação de *template.*

3.10 Como verificar o tempo em que o LNAPL atinge o nível d'água?

É possível observar o tempo em que o LNAPL atinge o nível d'água de duas formas. A primeira, através do frame ou da barra de rolagem de tempo que fica localizada no canto superior direito no gráfico "Saturações" (Figura 3.12). O usuário pode observar a elevação do lençol freático inserida previamente e analisar em que momento o LNAPL atinge essa elevação. A segunda forma se dá através do gráfico da "Frente de migração", que tem como eixos a profundidade e o tempo. Assim, é possível observar o tempo em que o produto atinge a elevação do lençol freático inserida (Figura 3.13).

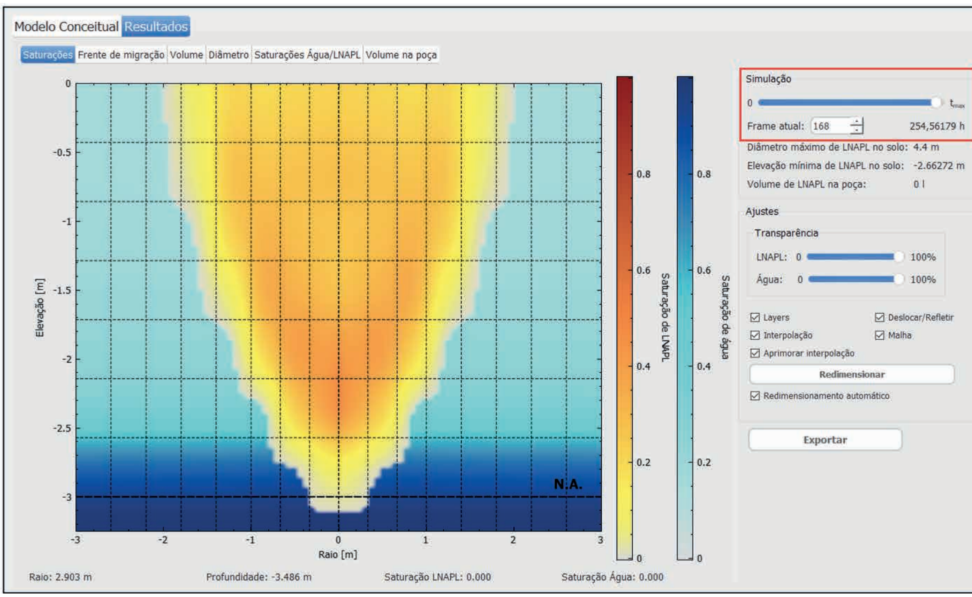


Figura 3.12. Nível d'água no gráfico saturações.

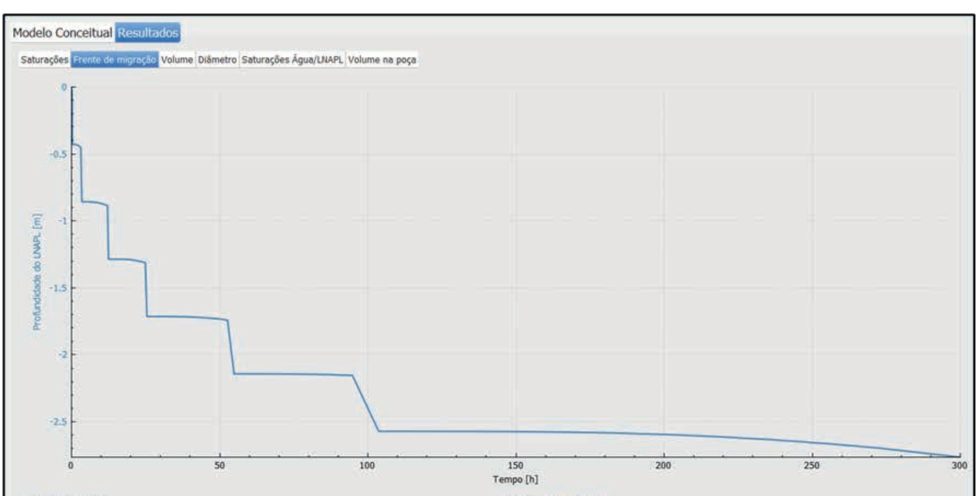


Figura 3.13. Nível d'água no gráfico Frente de migração.

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Este exemplo utiliza um cenário hipotético de uma refinaria fictícia a fim de apresentar as funcionalidades do TLS. Entre os objetivos apresentados por este problema estão:

a) Avaliar o comportamento de infiltração e distribuição de um vazamento de LNAPL com o modelo conceitual de empoçamento;

b) Verificar o tempo em que o contaminante atinge o lençol freático;

c) Avaliar o tempo necessário para esvaziamento da poça superficial; e

d) Identificar os volumes e as saturações do contaminante ao longo da infiltração.

4.1 Área de estudo e resumo do cenário de contaminação

A área de estudo corresponde a uma área de operação com bombas, dutos e tanques que armazenam produtos leves como nafta e gasolina. Após uma revisão de rotina, foi constatada uma ruptura em um dos dutos que armazenavam gasolina, ao qual ocasionou o vazamento do produto para o solo.

Com o objetivo de identificar o avanço da contaminação no solo subsuperficial, a simulação no TLS considerou o comportamento do vazamento como um empoçamento, visto que o vazamento do produto originou uma poça no solo superficial. Os demais dados de entrada foram escolhidos para se aproximar de um caso real.

4.2 Levantamento das informações para a simulação no TLS

4.2.1 Identificação da área de estudo

Após criar um novo projeto com o TLS, o usuário deve preencher a aba "Identificação da Área de Estudo". Este preenchimento pode ser feito previamente na aba do banco de dados, ou então, diretamente na interface, selecionando o ícone de localização. Para mais informações, consulte o Item 2.6. No estudo de caso em questão, foram preenchidas as seguintes informações, conforme indicado na Figura 4.1.

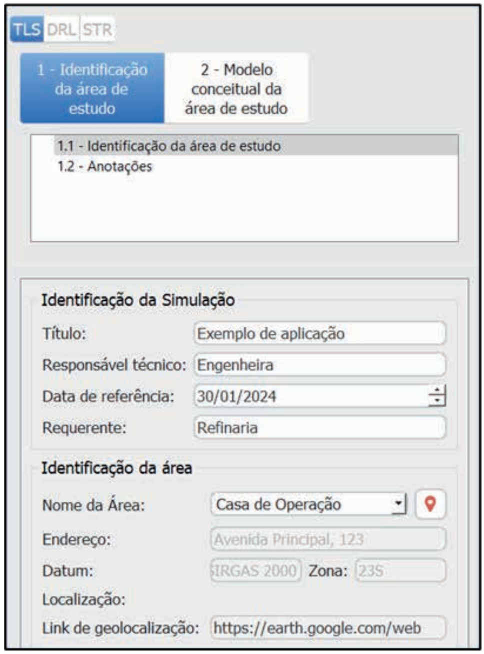


Figura 4.1. Identificação da área de estudo.

4.2.2 Modelo conceitual

Na aba "Modelo conceitual da área de estudo", deve-se selecionar o modelo conceitual que mais se aproxima do cenário de vazamento. O TLS apresenta três modelos: Tanque na superfície do solo, Tanque subterrâneo e Empoçamento. Para esse exemplo, foi escolhido o modelo Empoçamento (Figura 4.2), visto que esse seria o mais adequado no cenário apresentado, em que após o rompimento do duto, a gasolina se acumulou no solo no formato de uma poça.

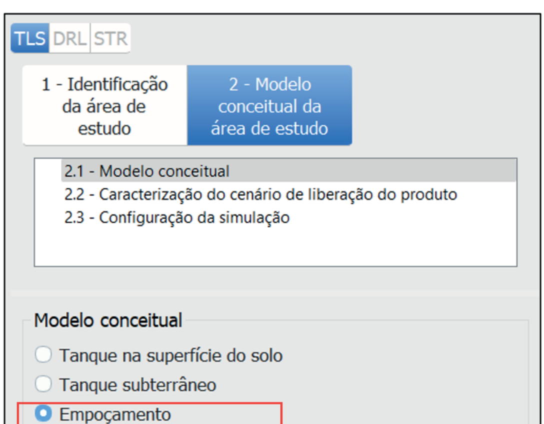


Figura 4.2. Seleção do modelo conceitual "Empoçamento".

4.2.3 Caracterização do cenário de liberação do produto

Em seguida, o usuário deve inserir os dados referentes à fonte de derramamento, ao contaminante e ao tipo de solo do local. A seguir são apresentados os parâmetros exigidos:

- **Dados da fonte**

Nesta etapa, são necessários os valores da altura do empoçamento de LNAPL, o diâmetro do empoçamento e a profundidade do lençol freático, todos inseridos em metros. Nesse caso, esses dados foram estimados após a refinaria constatar que foram derramados, aproximadamente, 3,5 m³ de produto em uma área disponível de 3 metros de diâmetro. Logo, a altura da poça que corresponde a este volume é igual a 0,5 metros. Na Figura 4.3, constam os valores adotados para esse cenário.

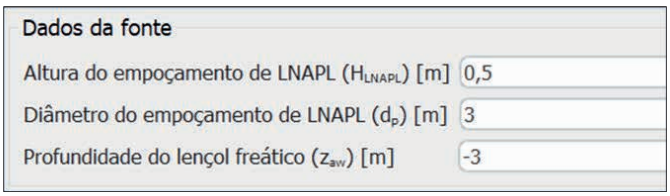


Figura 4.3. Dados da fonte.

- **Correção dielétrica**

A correção dielétrica é um diferencial do *software* TLS, pois, ao selecionar esta opção, é levada em consideração a interação elétrica entre o contaminante e o solo escolhido (Figura 4.4). Neste exemplo de aplicação, a correção dielétrica foi considerada.



Figura 4.4. Correção dielétrica.

- **Caracterização do contaminante**

O contaminante presente no local foi identificado como Gasolina A, correspondente ao produto armazenado no duto. A caracterização reológica desse produto foi avaliada pela refinaria e corresponde aos dados da Gasolina A, já cadastrada no banco de dados do TLS (Figura 4.5).

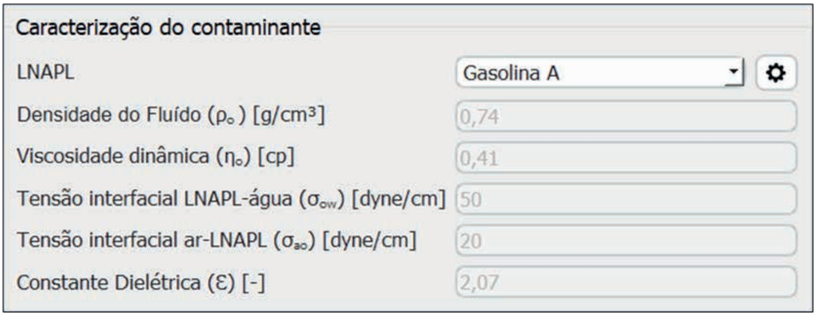


Figura 4.5. Caracterização do contaminante.

- **Caracterização do meio poroso**

A refinaria está inserida em um local com solo predominantemente arenoso, onde foram realizadas investigações que constataram dois tipos de solo em profundidades diferentes: areia argilosa e areia. Para representar esse cenário, foi cadastrado um novo tipo de solo (Areia argilosa) no banco de dados, com base nos resultados das sondagens e amostras coletadas no local. A "Areia", já disponível no banco de dados, foi escolhida como segunda camada do meio poroso. As condutividades hidráulicas foram inseridas com base em ensaios *slug test* previamente realizados, que indicaram condutividade na ordem de 1,32 x 10^{-6} para a Areia argilosa (Figura 4.6) e 7,65 x 10^{-5} m/s para a Areia (Figura 4.7) .

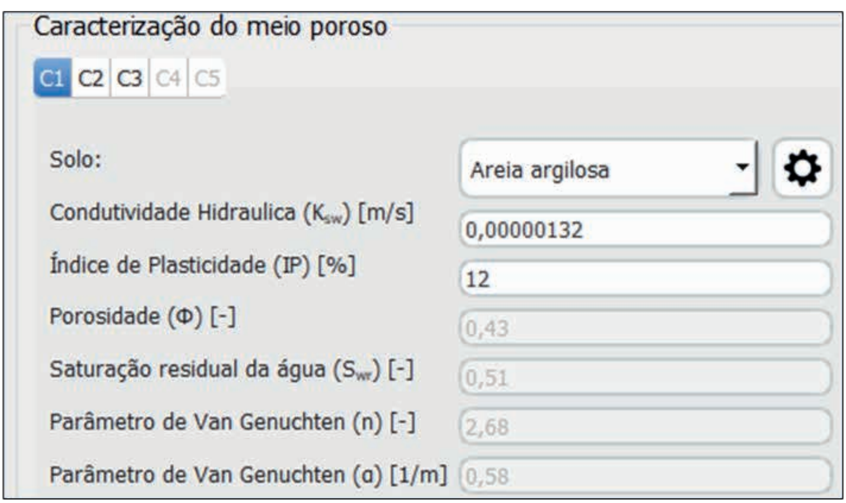


Figura 4.6. Caracterização da primeira camada de solo: areia argilosa.

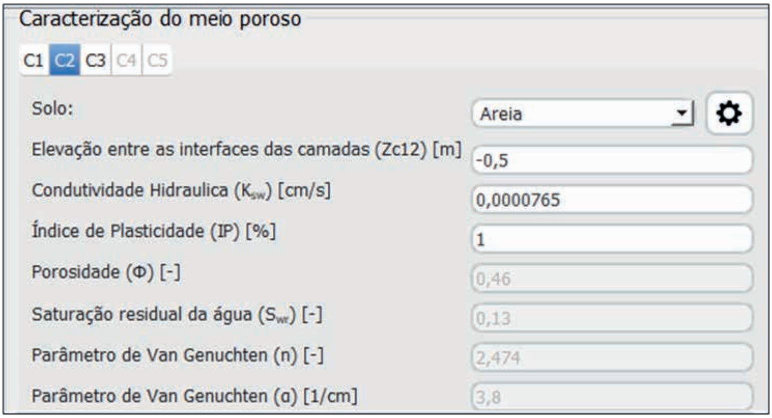


Figura 4.7. Caracterização da segunda camada de solo: areia.

Ao adicionar um novo solo no banco de dados, o usuário pode observar que os campos "Saturação residual máxima de LNAPL" e "Saturação trapeada máxima de LNAPL" não são obrigatórios ao TLS. Isso ocorre porque esses parâmetros são necessários ao *software* DRL, o qual tem o banco de dados compartilhado com o TLS. Portanto, para a simulação no TLS, esses campos não precisam ser preenchidos. Além disso, há um campo denominado "Observações", o qual pode ser preenchido com a referência das informações sobre o novo solo adicionado, ou seja, quando este não está no banco de dados do TLS (Figura 4.8).

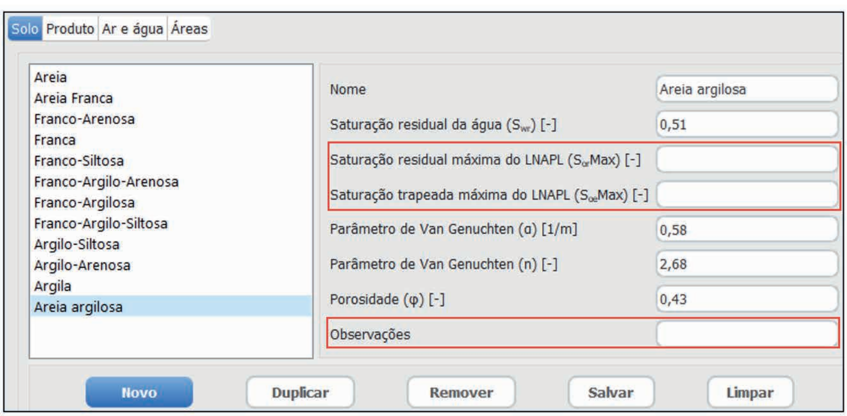


Figura 4.8. Campos de preenchimentos referentes ao DRL e observações.

4.2.4 Configuração da simulação

Em seguida, o usuário deve adicionar os parâmetros referentes ao desempenho da simulação. A seguir, é explicitado como cada um deles foi definido:

- **Parâmetros temporais**

O tempo final da simulação (t_f) não é um parâmetro conhecido. Para determiná-lo, a simulação foi iniciada com um tempo final de 2 horas, visto que não se sabe o tempo

total que o produto leva para atingir o lençol freático. Optou-se por começar com um tempo baixo, que foi aumentando gradualmente, até se obter um tempo final de 10 horas. Esse tempo permitiu visualizar o comportamento da infiltração do produto no solo até o nível d'água.

Neste exemplo, buscou-se determinar o tempo máximo de passo e tempo mínimo entre frames de modo a possibilitar um resultado mais refinado e de visualização adequada do acidente para o tempo final de 10 horas. Ou seja, para o tempo final de 10 horas, foi definido que o tempo máximo de passo que o simulador pode atingir é de 30 minutos (1800 s) e os frames mínimos devem ser armazenados a cada 100 segundos, conforme a Figura 4.9.

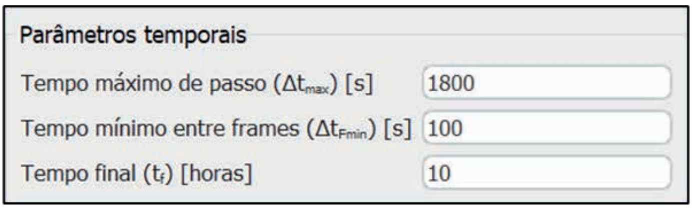


Figura 4.9. Parâmetros temporais.

- **Dimensões do domínio da simulação**

Esses parâmetros foram definidos levando em consideração o diâmetro do empoçamento (3 metros) e a profundidade do lençol freático (-3 metros). O raio máximo do domínio deve ser suficientemente grande para que o domínio não interfira no deslocamento horizontal do LNAPL. Recomenda-se que seja adotado um diâmetro, no mínimo, duas vezes maior que o raio do empoçamento ou tanque. Para escolher a elevação mínima, adotou-se um valor maior que o nível d'água, que é negativo (Figura 4.10).

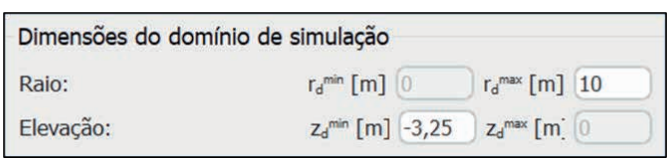


Figura 4.10. Dimensões do domínio de simulação.

- **Geometria das regiões proibidas**

Nesta simulação não foram consideradas regiões proibidas, pois não há obstáculos que interfiram na migração vertical do LNAPL.

- **Dimensões da célula do grid**

As dimensões da célula do grid devem possibilitar a visualização clara da simulação. Para isso, a simulação foi iniciada com um valor elevado de *dz* (0,6 m), que gerou uma malha menos refinada. Em seguida, foram realizados testes para identificar qual o melhor valor de *dz,* considerando um tempo de execução da simulação adequado. No gráfico apresentado na Figura 4.11 estão os resultados da frente de migração da mesma simulação

para diferentes valores de *dz* (0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,5 m e 0,6 m). É possível observar que todas as curvas convergem para a mesma profundidade no tempo final, independentemente dos valores de malha. Entretanto, a simulação que considera *dz* = 0,1 m apresenta maior refinamento. Nota-se também que, com um valor de *dz* maior (0,5 e 0,6 m), existe uma irregularidade numérica quando o nível d'água é atingido. Dessa forma, visto que não foram observadas limitações no tempo computacional, optou-se pela malha que proporciona melhor visualização dos resultados, ou seja, *dz* igual a 0,1 m.

Ademais, foi determinado um *dz* menor que *dr*, pois assim é possível um maior detalhamento do comportamento do óleo ao longo da elevação, que corresponde à direção de maior interesse na simulação, conforme a Figura 4.12. Para mais informações, consulte o Item 3.8.

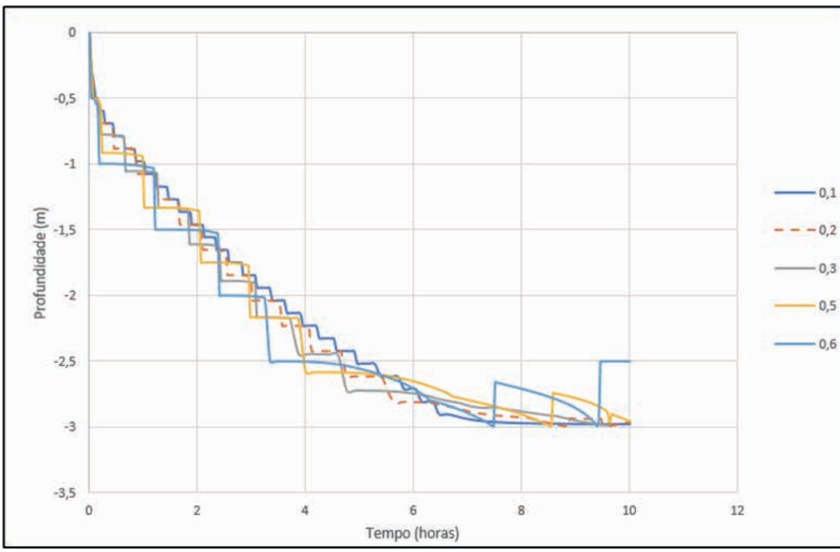


Figura 4.11. Gráfico de comparação entre *dz.*

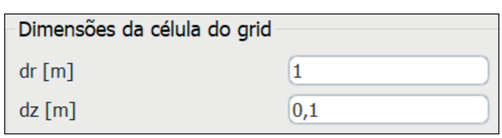


Figura 4.12. Dimensões da célula do grid.

- **Diretório**

Antes de executar a simulação, é necessário escolher uma pasta para armazenar os dados, clicando no ícone do campo "Diretório", conforme Figura 4.13.



Figura 4.13. Seleção do diretório para salvar os resultados.

• **Visualizar modelo conceitual da simulação**

Antes de executar a simulação, o usuário tem a opção de "Visualizar o modelo conceitual da simulação". Essa função permite a visualização prévia das configurações do domínio de simulação, antes de ser necessário sua execução (Figura 4.14 e Figura 4.15).

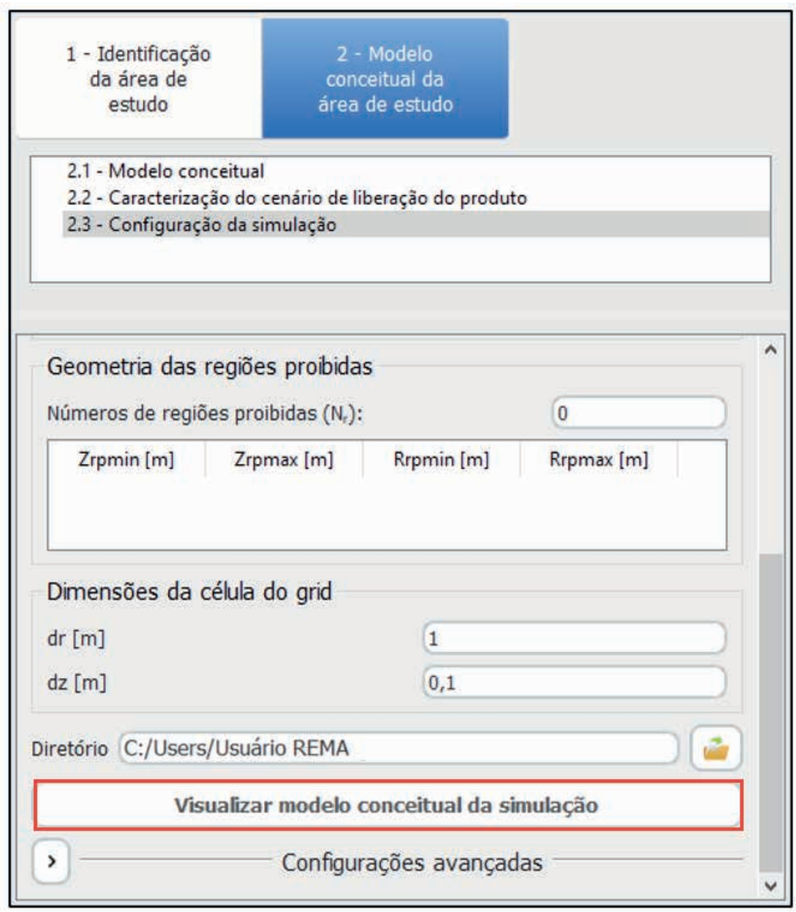


Figura 4.14. Botão para visualização prévia do modelo conceitual.

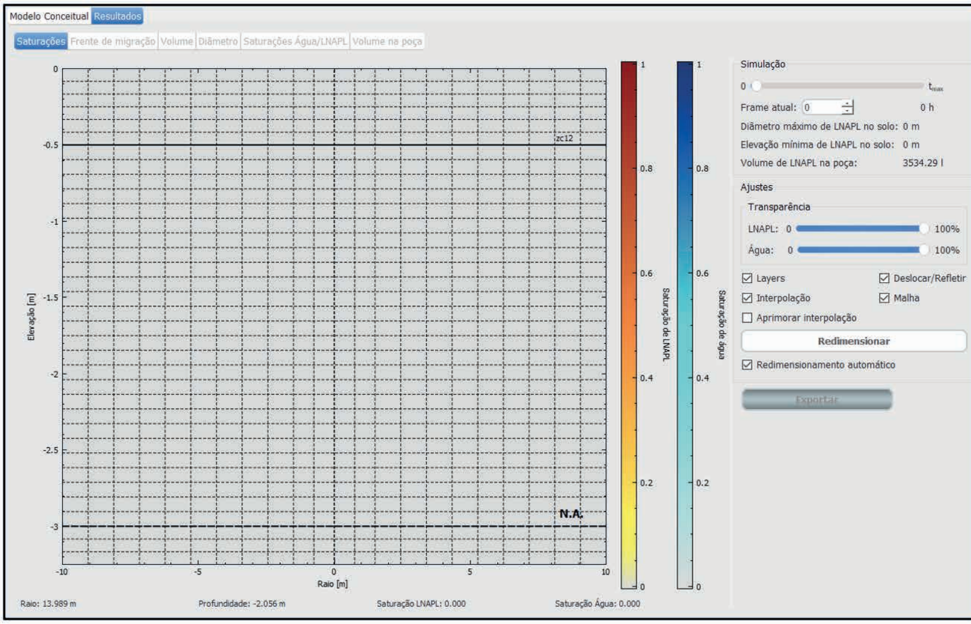


Figura 4.15. Visualização prévia do modelo conceitual.

- **Configurações avançadas**

Esses parâmetros possuem valores *default* iguais a tol_n = 0,01 metros e tol_e = 0,5 metros e estão relacionados ao erro admitido (Figura 4.16). Para usuários avançados, é indicado que sejam realizados testes com valores que funcionem para a resolução numérica do problema, começando com valores menores e aumentando conforme necessário. Entretanto, se o simulador informar que esses valores estão muito baixos, o usuário pode tanto aumentá-los, como aumentar os valores do grid, pois ambos estão relacionados.

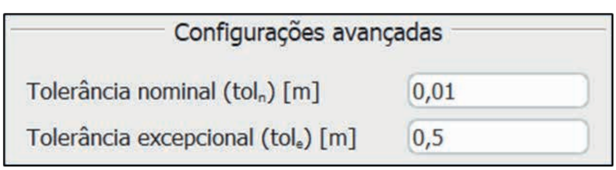


Figura 4.16. Configurações avançadas.

4.3 Resultados e discussão

Após cadastrar as informações, basta clicar no ícone de executar o TLS para calcular os resultados do transporte de LNAPL no solo. A apresentação dos resultados é dada na aba “Resultados”, e logo abaixo é possível visualizar os resultados individuais das “Saturações”, “Frentes de migração”, “Volume”, “Diâmetro”, “Saturações Água/LNAPL” e “Volume na poça”.

4.3.1 Saturações

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os resultados da saturação do LNAPL no solo em função do tempo. A profundidade está representada pelo eixo das coordenadas e o raio no eixo das abscissas. Ao avançar o tempo da simulação na barra de rolagem, o usuário pode visualizar o comportamento da infiltração e distribuição do produto ao longo do tempo.

Nota-se que o produto atinge a segunda camada de solo em 0,11 horas (frame = 4), conforme mostra a Figura 4.17. O nível de água é atingido em 10 horas, que corresponde ao frame 178 (Figura 4.18).

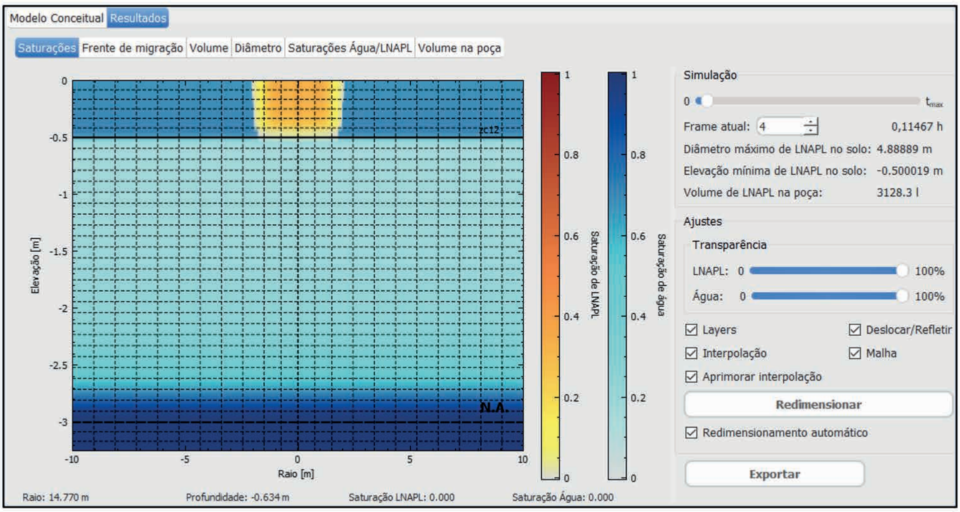


Figura 4.17. Resultado da saturação de LNAPL considerando o efeito da correção dielétrica na profundidade de 0,5 metros.

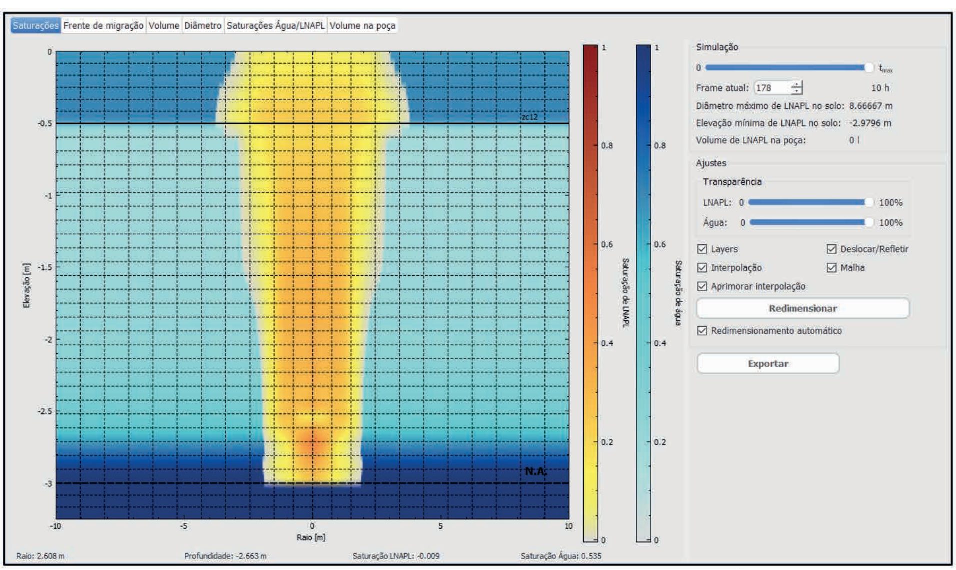


Figura 4.18. Resultado da saturação de LNAPL considerando o efeito da correção dielétrica na profundidade de 3,0 metros.

Observando os dados de saturação, é possível notar que, mesmo no frame máximo da simulação, a elevação mínima de LNAPL no solo é igual a -2,98 m (ou seja, não atinge a profundidade exata do lençol freático, igual a -3,0 m). Isso ocorre devido à franja capilar do solo, pois provoca uma saturação de água igual a 100% antes da profundidade de N.A inserida como dado de entrada. Portanto, considera-se que o LNAPL atinge o N.A quando a saturação de água é 100%, nesse caso, a -2,98 m. Esse comportamento é evidenciado nos resultados gráficos das "Saturações de Água/LNAPL", discutidos adiante.

A Figura 4.18 também destaca que a saturação de água na primeira camada de solo é maior que na segunda camada, o que afeta a maneira como o produto infiltra em cada camada. Nota-se também o aumento gradual da saturação de água ao se aproximar do nível d'água do lençol freático, representativo da espessura da franja capilar.

Na Figura 4.19, são apresentados os resultados de saturação sem a consideração da correção dielétrica, abordada no Item 3.3. Em comparação com a Figura 4.18, é possível visualizar como a escolha ou não dessa correção influencia na infiltração do produto no solo. Considerando a correção, no tempo final de simulação (10 horas), o contaminante já atingiu o nível d'água (-2,98 m). Quando a correção não é considerada, para o mesmo tempo de 10 horas, o produto ainda se encontra na profundidade igual a -1,08 m, gerando a uma diferença de 64%. Ressalta-se que a consideração da correção dielétrica resulta em um resultado mais fidedigno aos fenômenos que ocorrem no meio e, portanto, é sempre recomendada a sua utilização.

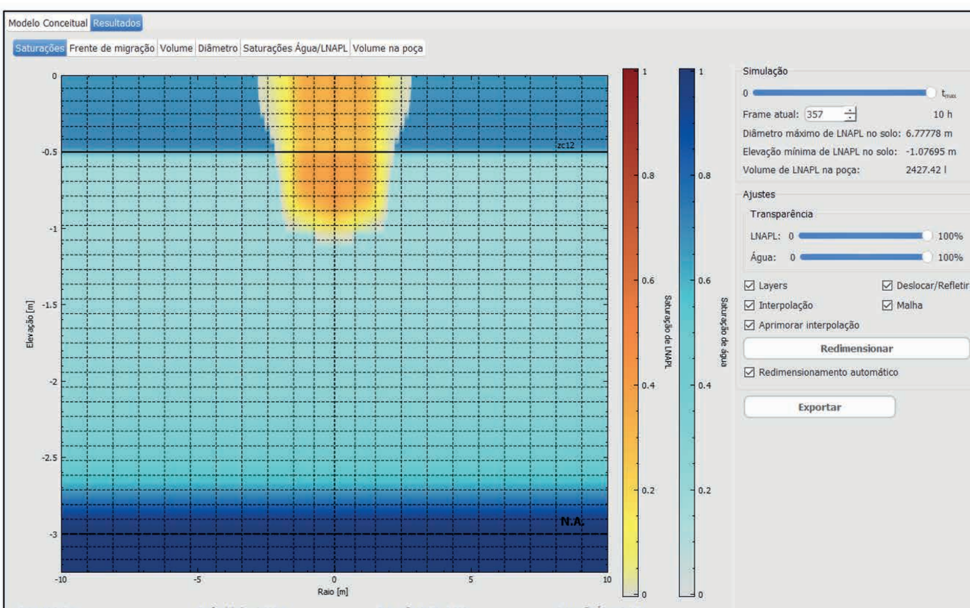


Figura 4.19. Resultado da saturação de LNAPL desconsiderando o efeito da correção dielétrica.

4.3.2 Frente de migração

A Figura 4.20 apresenta o gráfico da frente de migração de LNAPL. Do tempo inicial até 0,11 horas, ocorre uma infiltração rápida até a profundidade de -0,5 metros, correspondente à espessura da primeira camada de solo (areia argilosa). Após esse tempo, a infiltração começa a se propagar mais lentamente, na camada de solo que representa a "areia". É possível observar também que a infiltração começa a acontecer mais lentamente ao se aproximar da franja capilar, no tempo de 6,5 horas e profundidade -2,9 metros, devido ao aumento da saturação de água na região.

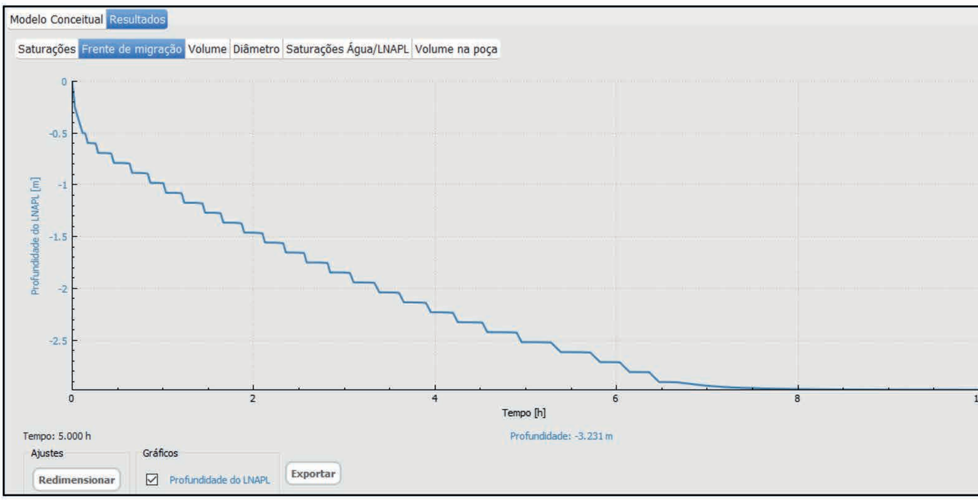


Figura 4.20. Gráfico da frente de migração para o exemplo de aplicação.

4.3.3 Volume

A Figura 4.21 traz o gráfico do volume acumulado de LNAPL e o volume por profundidade, ambos em função do tempo. Ao avançar a barra de rolagem, é possível verificar como o volume de óleo acumulado e volume por profundidade se comportam ao longo do tempo.

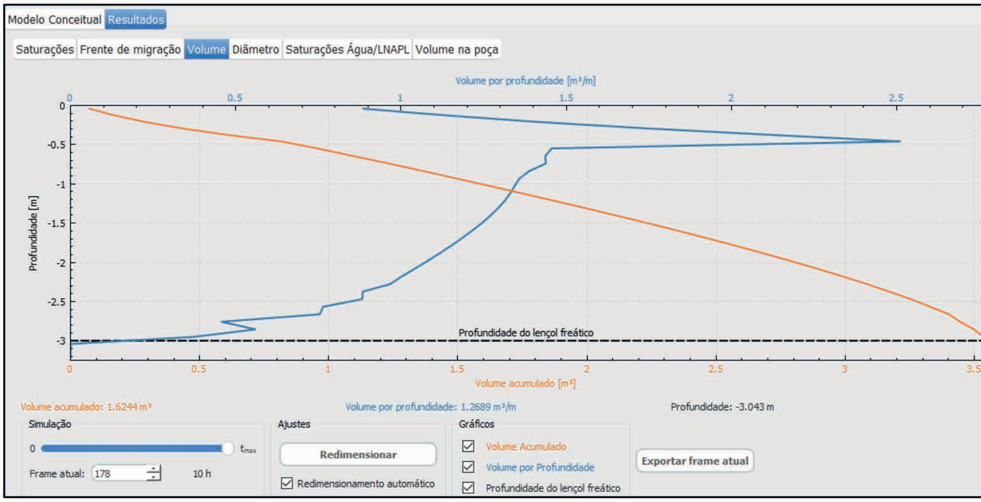


Figura 4.21. Resultado do volume acumulado de LNAPL e volume por profundidade do exemplo de aplicação.

4.3.4 Diâmetro

No gráfico do diâmetro (Figura 4.22) é possível observar o diâmetro atingido pelo produto conforme o avanço no tempo. Ao final da simulação (10 horas), o maior diâmetro alcançado foi de 8,7 metros, na profundidade igual -0,4 metros.

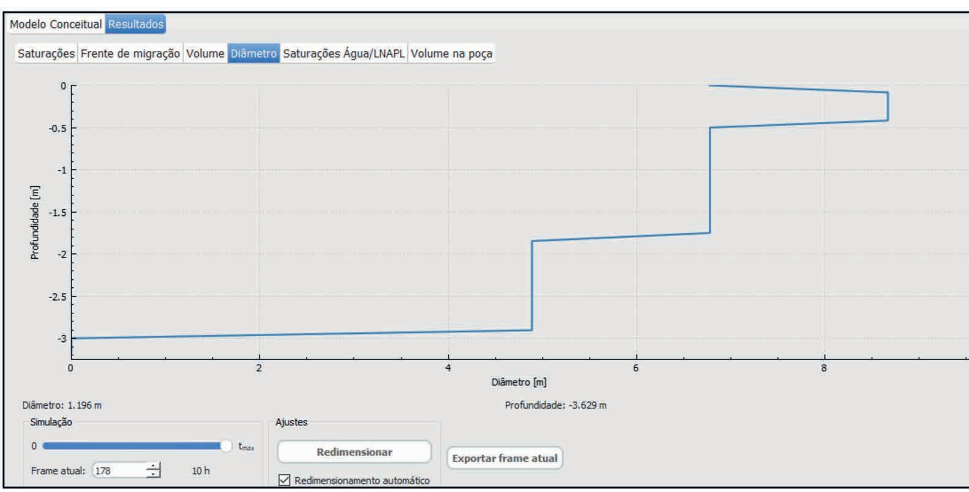


Figura 4.22. Resultado do diâmetro de LNAPL ao longo da profundidade para o exemplo de aplicação.

4.3.5 Saturações Água/LNAPL

A Figura 4.23 apresenta o gráfico das saturações de água e de LNAPL pela profundidade e pelo tempo. Aqui é possível notar que as duas camadas de solo inseridas para a simulação apresentam curvas de saturação de água distintas, onde a primeira

camada de areia argilosa conta com um valor de saturação de água mais elevado do que a segunda camada de areia. A seta na Figura 4.23 indica a profundidade -2,98 m, a qual apresenta saturação de água muito próxima de 1.

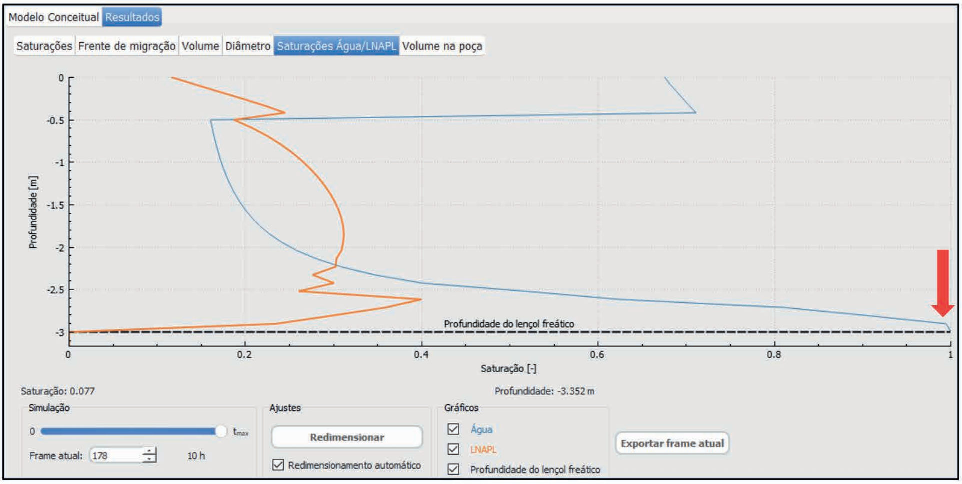


Figura 4.23. Resultados das saturações de água/LNAPL para o exemplo de aplicação.

4.3.6 Volume na poça

Na última aba dos resultados é possível visualizar o comportamento do volume da poça ao longo do tempo. Nota-se que ela esvazia após 3 horas de derramamento, ou seja, antes do tempo necessário para o nível d'água ser atingido e após a elevação da primeira camada de solo (0,5 metros). Esse resultado também pode ser visualizado na aba "Saturações", como mostra a Figura 4.25.

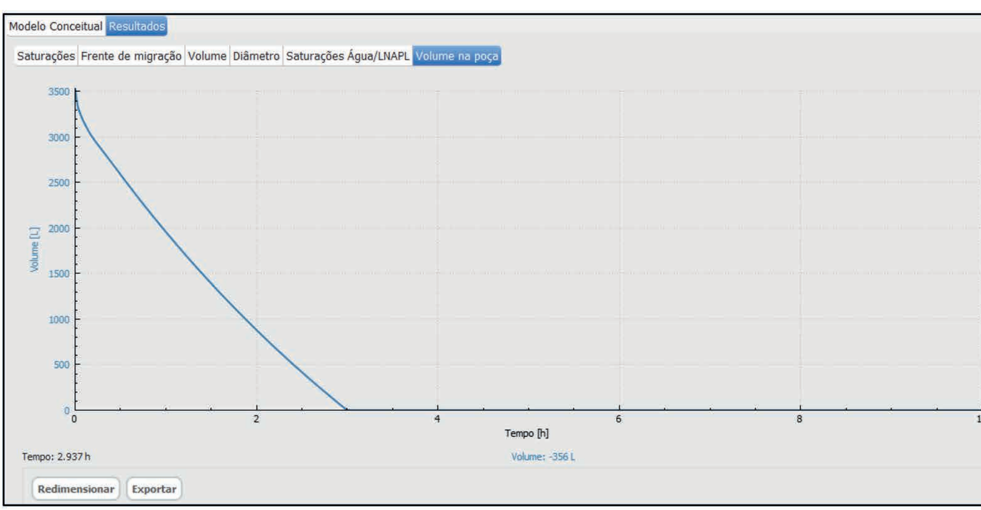


Figura 4.24. Resultado do volume de LNAPL na poça ao longo do tempo para o exemplo de aplicação.

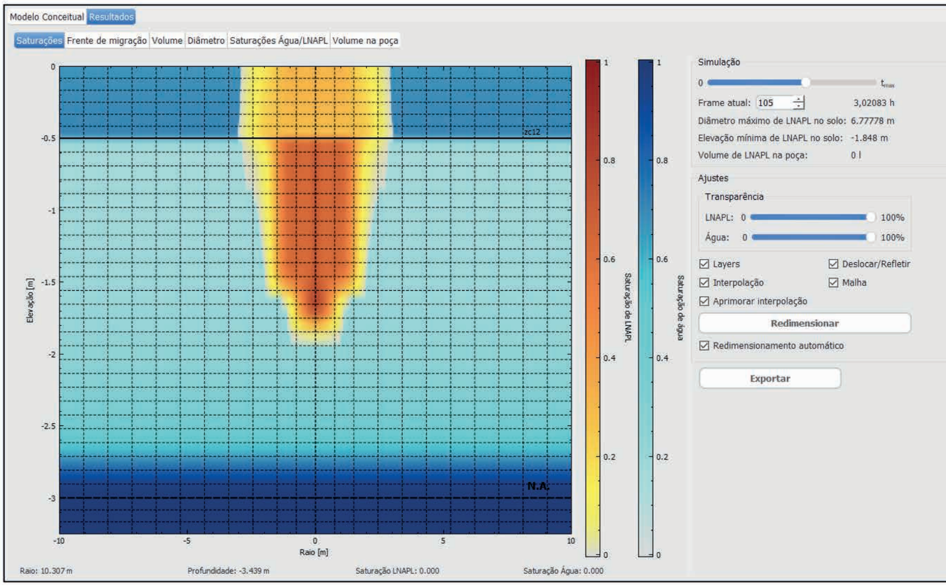


Figura 4.25. Resultado de saturações de LNAPL e água quando o volume da poça é igual a zero.

4.4 Conclusões

Após análise dos resultados, foi possível realizar as seguintes constatações:

- No cenário simulado, o contaminante atinge o lençol freático após 10 horas, conforme a Figura 4.18 e Figura 4.20;
- O efeito da correção dielétrica da Gasolina A, considerando o cenário simulado, provocou uma diferença de 64% na profundidade máxima alcançada pelo LNAPL (N.A.) em 10 horas;
- O contaminante avançou mais rapidamente na camada de areia argilosa (primeira camada) em comparação a segunda camada de areia, como observado no resultado do Item 4.3.2 e Figura 4.20. Esse comportamento ocorre, provavelmente, devido à maior pressão inicial de LNAPL na poça e maior interação elétrica entre o solo argiloso e o produto;
- Normalmente, assim que a poça de produto é esvaziada, a infiltração passa a ocorrer mais lentamente, pois há menos pressão de produto para infiltrar. Entretanto, esse fenômeno não pôde ser visualizado neste exemplo. A curva da Frente de Migração na Figura 4.20 não apresenta alteração significativa no comportamento da infiltração de produto após ocorrer o esvaziamento da poça (tempo igual a 3 horas). Isso se deve provavelmente a baixa altura que a poça possuía previamente, no início da simulação (0,5 metros); e
- As simulações realizadas com o TLS podem ser utilizadas para auxiliar no dimensionamento do tempo de resposta do plano de contingência para vazamentos acidentais e na adequação da permeabilidade do solo da bacia de contenção ao tempo de resposta do plano de contingência.

REFERÊNCIAS

AMORIM JÚNIOR, C. J. Avaliação dos critérios de impermeabilização de bacias de contenção da norma ABNT NBR 17505-2/2006 para terminais de armazenamento de petróleo e derivados. 127 f. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

BUDHU, M.; GIESE JR., R. F.; CAMPBELL, G.; BAUMGRASS, L. The permeability of soils with organic fluids. Canadian Geotechnical Journal, v. 28, n. 1, p. 140 147, 1991. https://doi.org/10.1139/t91-015

CARDOSO, LARISSA DA SILVA PAES. Estudo do transporte de poluentes imiscíveis em solos. 2011. 152 f. Tese (Doutorado) Curso de Energia e Ambiente, ENE, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

CORSEUIL, HENRY XAVIER; SCHNEIDER, MARCIO ROBERTO; GIACHINI, ADMIR JOSÉ; SOUZA FILHO, ANDRÉ MOREIRA DE. Avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção em áreas petrolíferas. Florianópolis, SC. Editora da UFSC, 2020. 211 p.

MACHADO, SANDRO LEMOS; CARDOSO, LARISSA DA SILVA PAES; OLIVEIRA, IARA BRANDÃO DE; MARIZ, DIGNA DE FARIA; KARIMPOURFARD, MEHRAN. Modeling Soil Permeability When Percolated by Different Soil. Transport in Porous Media, [S.L.], v. 111, n. 3, p. 763-793, 19 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11242-016-0627-9

OLIVEIRA, J. C. S. Contaminação de sedimentos argilosos por combustíveis automotivos: problema de avaliação da permeabilidade. p.129. 2001.

Guia do Usuário

TLS

Transporte de LNAPL no Solo

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

BR PETROBRAS
anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UFSC
rema NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE
Atena Editora
Ano 2024

Guia do Usuário

TLS

Transporte de LNAPL no Solo

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

@atenaeditora

www.facebook.com/atenaeditora.com.br

PETROBRAS

anp
Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

UFSC

rema
NÚCLEO RESSACADA DE PESQUISAS EM MEIO AMBIENTE

Atena Editora
Ano 2024